

**Augmentierungen für das Erlernen von Schaltsymboliken
im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der
Primarstufe**

.....

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Naturwissenschaftslehre (Dr. phil. nat.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Luisa Nadine Lauer

Saarbrücken
(2023)

Tag des Kolloquiums: 18. Dezember 2023

Dekan: Prof. Dr. Ludger Santen

Berichterstatter: Prof. Dr. Markus Peschel
Prof. Dr. Thomas Irion

Akad. Mitglied: PD Dr. Sarah Malone

Vorsitz: Prof. Dr. Rolf Pelster

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Markus Peschel für die wissenschaftliche Betreuung meiner Promotion sowie für das umfassende berufliche Mentoring. Danke für die umfassende Unterstützung und Beratung, die maßgeblich zur erfolgreichen Überwindung aller möglicher „Krisen einer Promotion“ beigetragen haben. Danke für die Ermöglichung dieser fordernden, aber unvergesslichen Etappe der beruflichen wie persönlichen Weiterentwicklung. Ein langes Kapitel „Promotion“ geht sehr bald zu Ende und ich freue mich auf viele weitere gemeinsame Projekte in Lehre und Forschung.

Darüber hinaus bedanke ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Thomas Irion für spannende Diskurse und Anregungen, die meine Dissertation sowie meine wissenschaftliche Verortung im Allgemeinen sehr bereichert haben. Danke für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit im Rahmen spannender Projekte sowie für die Begutachtung meiner Dissertation.

Ein weiterer herzlicher Dank gilt PD Dr. Sarah Malone für die wertvolle Unterstützung und Beratung bei diversen Studien und Publikationen und dafür, dass sie Teil des Prüfungsausschusses des wissenschaftlichen Kolloquiums gewesen ist.

Außerdem danke ich Prof. Dr. Rolf Pelster für die Übernahme des Vorsitzes über den Prüfungsausschuss.

Für die unentwegte persönliche wie berufliche Unterstützung und das herzliche Miteinander möchte ich mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Mitgliedern der AG Didaktik des Sachunterrichts sowie allen „assozierten Mitgliedern“ der AG bedanken. Danke für die Beratung in wissenschaftlichen Fragen im Rahmen zahlreicher Wissenschaftstreffen. Danke für all die großartigen Küchen- und Flurgespräche, für das regelmäßige gemeinsame Einverleiben diverser kulinarischer Köstlichkeiten (meist in Form von Kuchen) und für das stete gemeinsame Lachen. Ihr seid mir sehr ans Herz gewachsen.

Dem gesamten Team des ehemaligen Projekts „GeAR“ danke ich recht herzlich für die spannenden gemeinsamen Forschungs- und Publikationsarbeiten. Ganz besonders danke ich Kristin Altmeyer für die angenehme und bereichernde Zusammenarbeit und die konsequente gegenseitige Motivation in herausfordernden Zeiten. Allen „GeAR“-Kolleginnen und -Kollegen wünsche ich weiterhin beruflich wie privat alles Gute.

Danken möchte ich ebenso allen Personen, mit denen ich im Laufe der vergangenen Jahre im Rahmen verschiedenster Projekte und Aktivitäten zusammenarbeiten durfte. Insbesondere sind dies die Mitglieder des Arbeitskreises AG Didaktik der Physikalischen Chemie und der

Didaktik der Chemie um Prof. Dr. Christopher W. M. Kay. Dabei sind vor allem Jun.-Prof. Dr. Johann Seibert sowie Dr. Vanessa Lang zu nennen, bei denen ich mich herzlich für die spannenden und bereichernden gemeinsamen Projekte und Gespräche sowie für den unterstützenden persönlichen Austausch bedanke.

Zuletzt gilt mein tiefster Dank meinen Familien und meinem Freundeskreis. Danke für den Rückhalt, für die gemeinsamen Erlebnisse und für das bedingungslose Füreinander-da-Sein.

I Zusammenfassung / Abstract	iii
II Abkürzungsverzeichnis	v
III Übersicht über alle Publikationen der kumulativen Dissertationsschrift in der Reihenfolge der Einbindung	vii
1 Einleitung inkl. Motivation, Zielsetzung und Forschungsstand	1
1.1 <i>Digitale Medien in der Lebenswelt und in Lehr-Lern-Situationen</i>	5
1.1.1 Digitale Medien in der Lebenswelt (von Grundschulkindern)	5
1.1.2 Digitale Medien in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts).....	6
1.2 <i>Modellierungen zum Einsatz (digitaler) Medien (im Sachunterricht)</i>	9
1.3 <i>Augmented Reality (AR)</i>	12
1.3.1 Technische Spezifikation von AR-Technologie(n).....	12
1.3.2 AR in der Lebenswelt von Grundschulkindern	15
1.3.3 AR in Lehr-Lern-Situationen.....	15
1.4 <i>Augmentierungen zum Erlernen von Schaltsymboliken</i>	22
Thema der Dissertation	24
2 Publikationen der Dissertationsschrift	25
2.1 <i>Potenzial von AR in Lehr-Lern-Situationen</i>	26
2.1.1 Modellierungen des Einsatzes von AR als Medium in Lehr-Lern-Situationen.....	26
2.1.1.1 Modellierungen Medialen Lernens im Sachunterricht	26
2.1.1.2 Modellierung für den Einsatz von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht.	34
2.1.2 AR-Lehr-Lern-Tool zum Erlernen von Schaltsymboliken im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe.....	42
2.1.2.1 Prototyp 1	42
2.1.2.2 Prototyp 2	48
2.1.3 Praxisideen für AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe	56
2 <i>Technische Möglichkeiten und Grenzen von AR-Technologien für den Einsatz mit Grundschulkindern</i>	70
2.2.1 Usability von AR-Brillen beim Einsatz mit Grundschulkindern	70

<i>2.3 Pädagogisch-didaktische Möglichkeiten und Grenzen von AR-Technologien für den Einsatz mit Grundschulkindern</i>	97
2.3.1 Pedagogical Usability als Konstrukt zur Beurteilung des pädagogisch-didaktischen Potenzials medial gestützter Lehr-Lern-Tools	97
2.3.2 Beurteilung der Pedagogical Usability des AR-Lehr-Lern-Tools zum Erlernen von Schaltsymboliken durch Grundschullehrkräfte	103
3 Fazit und Ausblick	149
4 Literaturverzeichnis	155
5 Abbildungsverzeichnis	174
6 Anhang	175
6.1 <i>Ergänzende Materialien und Daten der empirischen Studien</i>	175
6.2 <i>Auflistung weiterer Publikationen außerhalb der Dissertationsschrift</i>	175

I Zusammenfassung / Abstract

Ziel der Dissertation war die Gewinnung grundlegender Erkenntnisse zum fach-medien-didaktischen Einsatz von Augmented Reality (AR) im Sachunterricht der Primarstufe für das exemplarische Thema Schaltsymboliken. Die kumulative Dissertation beinhaltet acht Publikationen: sowohl theoretisch-konzeptionelle wie auch empirische Arbeiten. Insgesamt beziehen sich die Ziele der Dissertation und damit auch ihre Ergebnisse auf Grundlagenforschung zum Einsatz von AR im Sachunterricht. Im Speziellen werden Überlegungen zum Einsatz und zur Wirkung von AR in Lehr-Lern-Situationen vor einer tatsächlichen Erprobung adressiert. Die Ergebnisse der Dissertation sollen sowohl vertikale Anknüpfungspunkte (bzgl. des Prozesses der Implementierung von AR in reale Lehr-Lern-Situationen) sowie horizontale Anknüpfungspunkte (bei anderen Themen im Sachunterricht der Primarstufe oder auch in Bezugsfächern der Sekundarstufen) für weitere Forschung zu AR im Sachunterricht bieten. Zunächst werden Modellierungen zum fach-medien-didaktischen Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts) skizziert und notwendige Weiterentwicklungen werden diskutiert. Anschließend zeigen sowohl die theoriegeleitete Konzeption als auch die praktische Entwicklung und Pilotierung konkreter AR-Lehr-Lern-Tools die Herausforderung der Aushandlung zwischen pädagogisch-didaktischen Gestaltungsansprüchen und deren technischer Umsetzung in Bezug auf die Nützlichkeit (Usefulness) von (AR-)Tools in Lehr-Lern-Situationen auf.

The objective of this dissertation was the acquisition of fundamental insights into the subject-media-didactic use of augmented reality (AR) in primary (social and) science studies. The cumulative dissertation encompasses eight publications, including both theoretical-conceptual and empirical work. Overall, the goals of the dissertation and thus its results relate to fundamental research on the use of AR in education and address initial considerations on the use and impact of AR in teaching-learning situations prior to an actual testing. The results of the dissertation are intended to provide both vertical connections (concerning the process of implementing AR in real teaching-learning situations) and horizontal connections (with other topics in primary (social and) science studies or with related subjects in secondary education) for further research on AR in science education. First, models for the subject-media-didactic use of AR in teaching-learning situations (in in primary (social and) science studies) are outlined and further developments are discussed. Subsequently, both the theory-based conception and the practical development and testing of specific AR teaching-learning tools demonstrate the challenge of negotiating between pedagogical-didactical design requirements and their technical implementation regarding the usefulness of (AR-) tools in teaching-learning situations.

II Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality	KIM	Kindheit, Internet, Medien
CLT	Cognitive Load Theory	KMK	Kultusministerkonferenz
CATML	Cognitive-Affective Theory of Multimedia Learning	MBK	Ministerium für Bildung und Kultur (des Saarlandes)
CTML	Cognitive Theory of Multimedia Learning	MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
DGfE	Deutsche Gesellschaft für Erziehungswissenschaft	mpfs	Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest
DPACK	Digitality-related Paedagogical and Content Knowledge	MR	Mixed Reality
GDSU	Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts	OST	Optical See-Through
GFD	Gesellschaft für Fachdidaktik	PU	Pedagogical Usability
GSV	Grundschulverband	RANG	Reflexion, Analyse, Nutzung und Gestaltung
GI	Gesellschaft für Informatik European Science Education Research Association	SAMR	Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition
ESERA	European Science Education Research Assicoation	TPACK	Technological Pedagogical Content Knowledge
HHD	Handheld Display	VST	Video See-Through
HMD	Head-Mounted Display	VR	Virtual Reality
iPAC	Personalisation, Authentizität und Kollaboration als Aspekte des Lernens mit mobilen Endgeräten		
KI	Künstliche Intelligenz		

III Übersicht über alle Publikationen der kumulativen Dissertationsschrift in der Reihenfolge der Einbindung

1: Lauer, L., Peschel, M., Bach, S., & Seibert, J. (2020). Modellierungen Medialen Lernens. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 382–387). Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830992462>.

2: Seibert, J., Lauer, L., Marquardt, M., Peschel, M., & Kay, C. W. M. (2020). deAR: didaktisch eingebettete Augmented Reality. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 451–456). Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830992462>.

3: Lauer, L., Peschel, M., Malone, S., Altmeyer, K., Brünken, R., Javaheri, H., Amiraslanov, O., Grünerbl, A., & Lukowicz, P. (2020). Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education. *The Physics Teacher*, 58(7), 518–519. <https://doi.org/10.1119/10.0002078>.

4: Lauer, L., Peschel, M., Javaheri, H., Lukowicz, P., Altmeyer, K., Malone, S. & Brünken, R. (2022). Augmented Reality-Toolkit for Real-Time Visualization of Electrical Circuit Schematics. *Fostering Scientific Citizenship in an uncertain world* In G.S. Carvalho, A.S. Afonso & Z. Anastácio (Eds.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world* (Proceedings of ESERA 2021), Part 4 /Strand 4. Digital Resources for Science Teaching and Learning (Co-Hrsg. J. Bruun & J. Haglund), (S. 291–296). Braga: CIEC, University of Minho. ISBN 978-972-8952-82-2.

5: Lauer, L. & Peschel, M. (2022). Praxisideen für Augmented Reality (AR) im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht. In B. Brandt, L. Bröll & H. Dausend (Hrsg.), *Digitales Lernen in der Grundschule III* (S. 227–238). Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830995913>.

6: Lauer, L., Altmeyer, K., Malone, S., Barz, M., Brünken, R., Sonntag, D., & Peschel, M. (2021). Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children. *Sensors*, 21(19), 6623. <https://doi.org/10.3390/s21196623>.

7: Lauer, L., & Peschel, M. (2022). Inwiefern eignen sich Augmented Reality-Technologien für den Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe? *GDSU-Journal*, 13, 94–96.

8: Lauer, L. & Peschel, M. (2023). ‹Pedagogical Usability› von Augmented Reality zum Thema Elektrik – Eine qualitative Studie zum Potential des Einsatzes von AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe. *MedienPädagogik*, 51 (AR/VR - Part 2), 25–64. <https://doi.org/10.21240/mpaed/51/2023.01.11.X>.

1 Einleitung inkl. Motivation, Zielsetzung und Forschungsstand

Motivation: Im Alltag begegnet uns Augmented Reality (AR), eine Technologie zur Anreicherung der Realität mit virtuellen Informationen (vgl. z. B. Azuma et al. 2001: 34) bei Spieleanwendungen auf dem Smartphone oder bei der virtuell unterstützen, probeweisen Einrichtung des Wohnzimmers mit einem potenziellen neuen Möbelstück. Seit kurzem können wir AR auch nutzen in Form von Echtzeit-Einblendungen bei der Navigation in der Kamerasicht unseres Smartphones (vgl. z. B. Amadeo 2022). Während die meisten Menschen im Alltag derzeit noch ihre ersten Erfahrungen mit AR machen, ist AR in der Industrie keineswegs mehr eine brandneue Technologie. Caudell & Mizell (1992) benannten ein auf dem Kopf getragenes Assistenzsystem für Fertigungsarbeiten im Flugzeugbau erstmals mit dem Begriff „Augmented Reality“ (ebd. 660). Mittlerweile hat AR den Status der „aufstrebenden Technologie“ abgelegt (vgl. Gartner Hype Cycle, Gartner 2013, zitiert nach Mehler-Bicher & Steiger 2014: 4 f). AR ist mittlerweile integraler Bestandteil des Arbeitens geworden im Bereich Lagerung und Logistik (vgl. z. B. Rejeb et al. 2021), bei der Wartung technischer Anlagen (vgl. z. B. Palmarini et al. 2018), aber auch bei Echtzeit-Assistenzsystemen für chirurgische Eingriffe (vgl. z. B. Castelan et al. 2021).

Aufgrund der beschriebenen zunehmenden Alltagserfahrungen mit AR und der stark vorangeschrittenen Durchdringung der Berufswelt gewinnt AR für auch heutige Schülerinnen und Schüler an Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung (Klafki 2007). AR verfügt durch die Verschmelzung von Realität und Virtualität über ein einzigartiges ein pädagogisch-didaktisches Gestaltungselement, welches erforscht werden muss. Insbesondere die Fokussierung auf die Realität als Hauptbezugsebene könnte im Vergleich zu Virtual Reality (VR) eher für einen Einsatz von AR in realen (schulischen) Lehr-Lern-Situationen sprechen. AR findet derzeit – deutlich nach der Zeit des Hypes in der Industrie – vermehrt Einzug in den Unterricht, meist in Form von gebrauchsfertigen Anwendungen zur Visualisierung von virtuellen Objekten und / oder Zusatzinformationen. Bei näherer Betrachtung vieler solcher Anwendungen entsteht der Eindruck, dass AR oft genutzt zu werden scheint, weil es innovativ ist bzw. einen „Eye-Catcher“ erzeugt. Nur in sehr wenigen Fällen wurden bzw. werden die pädagogisch-didaktischen Gestaltungsmöglichkeiten explizit genutzt. Hinzu kommt, dass aus didaktischer Sicht vielversprechendere AR-Brillen (gegenüber der aktuell verbreiteten AR in der Kamerasicht von Smartphone oder Tablet) derzeit wegen notwendiger technischer Verbesserungen und sehr hoher Anschaffungskosten noch nicht in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden können.

Für die Zielgruppe „Schülerinnen und Schüler der Primarstufe“ gibt es mittlerweile dank fortschreitender technischer Bedienungsverbesserungen von AR-Geräten für junge Menschen

spezielle AR-Anwendungen (vornehmlich für Tablet und Smartphone). Allerdings fehlen geeignete Modellierungen des fach-medien-didaktischen¹ Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen. Daher besteht vor allem im Sachunterricht der Primarstufe ein erhebliches Forschungs- und Entwicklungsdesiderat bzgl. Anwendungen und Modellierungen für fach-medien-didaktische AR im Sachunterricht der Primarstufe. Als exemplarisches Themenfeld zur Konzeption entsprechender AR-Anwendungen für den naturwissenschaftlich-orientierten² Sachunterricht kristallisiert sich aufgrund guter Anschlussfähigkeit an bestehende AR-Anwendungen und -Forschungen das Thema Elektrik heraus.

Zielsetzung: Ziel der Dissertation ist die Erlangung grundlegender theoretisch-konzeptioneller und empirisch fundierter Erkenntnisse zum Einsatz von AR im Sachunterricht der Primarstufe. Entlang des leitenden Themas „Augmentierungen für das Erlernen von Schaltsymboliken im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe“ werden folgende Fragen adressiert:

1. Wie lässt sich der fach-medien-didaktische Einsatz von AR im Sachunterricht modellieren?
2. Wie lässt sich ein fach-medien-didaktisches AR-Lehr-Lern-Tool³ zu Schaltsymboliken konzipieren und technisch realisieren?
3. Welche weiteren fach-medien-didaktischen AR-Tools bzw. -Anwendungen lassen sich für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht skizzieren?
4. Wie „benutzbar“ sind AR-Technologien, mit denen das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken realisiert werden soll, aus technischer Sicht mit Kindern im Grundschulalter?
5. Wie „benutzbar“ ist das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken aus pädagogisch-didaktischer Sicht?

¹ „Fach-medien-didaktisch“ meint eine fachdidaktische Rekonstruktion (Duit et al. 2012; Kattmann et al. 1997) unter Einbezug des Mediums, s. a. Kapitel 1.1.2.

² Da diese Arbeit Grundlagenforschung adressiert, findet eine vielperspektivische (GDSU 2013) Rekonstruktion bzw. Verortung des in den späteren Kapiteln vorgestellten Lehr-Lern-Tools nicht statt. Um diesen Unterschied zur eigentlichen Konzeption des Sachunterrichts begrifflich hervorzuheben, wird im Rahmen der Arbeit von einem naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht gesprochen.

³ Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bezeichnung „Lehr-Lern-Tool“ verwendet für ein Set bestehend aus Experimentiermaterial, Soft- und Hardware zur Visualisierung von Schaltsymboliken. Durch diese Bezeichnung soll insbesondere das Verständnis dieses Sets als Lernwerkzeug im Sinne eines Lernens *mit* Medien (Peschel 2016, s. a. Kapitel 1.1.2) betont werden. In einigen Publikationen, welche in die Dissertationsschrift eingebunden sind, wurde diese Bezeichnung allerdings (noch) nicht verwendet, da sie im Zuge der Arbeiten an der Dissertation geändert wurde.

Die empirischen Untersuchungen im Rahmen der Dissertation begleiteten einen iterativen Entwicklungsprozess des beschriebenen AR-Lehr-Lern-Tools beziehen. Eine anschließende Erprobung des AR-Lehr-Lern-Tools mit Schülerinnen und Schülern in der Schulpraxis ist nicht Teil der Dissertation und muss daher im Rahmen von anschließenden Studien erfolgen. Das AR-Lehr-Lern-Tool zur Visualisierung von Schaltsymboliken adressiert einen isolierten Fachinhalt innerhalb der naturwissenschaftlichen Perspektive des Sachunterrichts (vgl. GDSU 2013; Giest 2017), sodass empirische Erkenntnisse unter kontrollierten Bedingungen überhaupt erst gewonnen werden konnten. Eine vielperspektivische Adressierung und Beforschung von Augmentierungen im Sinne des vielperspektivischen Verständnisses der Didaktik des Sachunterrichts (GDSU 2013) könnte Gegenstand von auf den Ergebnissen dieser auf Grundlagenforschung fokussierten Arbeit aufbauenden Projekten sein.

Aufbau der Dissertation

Im ersten Kapitel wird zunächst das übergeordnete Thema der Dissertation entwickelt aus dem Stand der Forschung. Den wesentlichen Argumentationsgang für diese Herleitung zeigt Abb. 1: Zu Beginn werden die Bedeutung (digitaler) Medien für die Lebenswelt (von Grundschulkindern) sowie die Wirkungen (digitaler) in Lehr-Lern-S

ituationen expliziert. Außerdem werden verschiedene Modellierungen und Diskurse zum Einsatz digitaler Medien in Lehr-Lern-Situationen erläutert. Daraufhin erfolgen die Spezifikation auf die Technologie Augmented Reality (AR) sowie die Begründung der exemplarischen Auswahl des Lerninhalts Schaltskizzen. Schließlich wird das übergeordnete Thema für die in Kapitel 2 aufgeführten Publikationen herauskristallisiert.

Details zur Gliederung von Kapitel 2 „Publikationen der Dissertationsschrift“ zeigt Abb. 9 (s. Anfang von Kapitel 2).

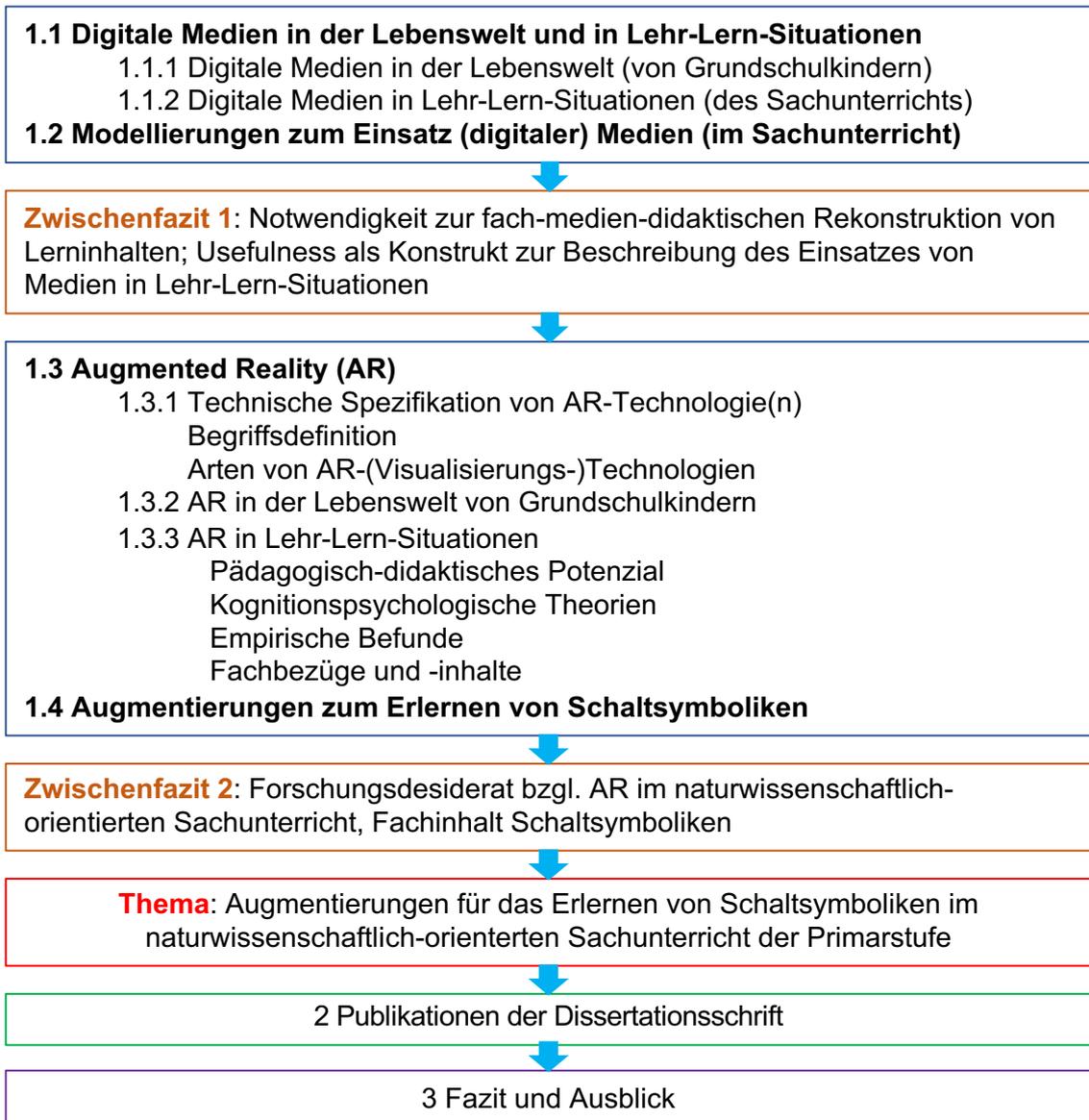


Abbildung 1: Gliederung der Arbeit mit Fokus auf der Einleitung.

1.1 Digitale Medien in der Lebenswelt und in Lehr-Lern-Situationen

1.1.1 Digitale Medien in der Lebenswelt (von Grundschulkindern)

„Digitale Telefone, Uhren, Brillen, Haushalte und Autos. Digitale Stadtverwaltungen, Wirtschaft, Wahlen, Gesundheits- und Pflegesysteme. Digitale Freundschaften, Schönheitsideale, Partnersuche, Kommunikation und Freizeitgestaltung. Derzeit wird alles digitalisiert, was nicht niet- und nagelfest ist – selbst Kühlschränke, Wohnzimmerleuchten und Kaffeemaschinen.“ (Irion 2018: 3)

Irion (ebd.) beschreibt verschiedene Aspekte einer Durchdringung der Lebenswelt mit digitalen Technologien, die einher geht mit a) neuen technischen Möglichkeiten und b) gesellschaftlichen Umgangsformen. Dies wird oft als „Digitalisierung“ (z. B. Döbeli Honegger 2016: 44 ff) oder „digitaler Wandel“ (z. B. Petko et al. 2018: 158 ff) bezeichnet. Viele Vorgänge in der Lebenswelt konnten durch solche Digitalisierungen automatisiert, gemessen oder (besser) kontrolliert werden, indem neue Möglichkeiten der Erfassung, Speicherung, Verarbeitung, Automatisierung, Übermittlung und Verbreitung von Daten genutzt wurden (Döbeli Honegger 2016: 44 ff). Im technischen Verständnis bezieht sich der Begriff „Digitalisierung“ zunächst auf die Umwandlung analoger in digitale (also 0-und-1-basierte) Signale (Herzig 2017, zitiert nach Irion et al. 2023: 27). Da die durch die Digitalisierung hervorgerufenen Veränderungen bzw. Auswirkungen nahezu alle Bereiche der Lebenswelt betreffen (Kerres 2018: 1) und sich „analog“ und „digital“ kaum noch voneinander trennen lassen, sprechen Irion et al. (2023) von einer „Digitalität“ (ebd.: 27 f) und betonen damit insbesondere die gesellschaftswirksamen und zu unserer Lebensrealität gewordenen Aspekte dieser zunehmenden Verschmelzung des Analogen und des Digitalen.

Im Zuge der Debatte um Digitalisierung und Lebenswelt wurde auch der Medienbegriff differenziert: Während Medien grundsätzlich Kommunikationstechnologien darstellen, die einen Austausch von Informationen verschiedener Art ermöglichen (vgl. z. B. Zimmermann 2002: 42), sind digitale Medien speziell *computerbasierte* (also 0-und-1-basierte) Medien (Herzig 2012; Mitzlaff 2016). Außerdem können mittels digitaler Medien auch multimediale Inhalte (vgl. z. B. Multimedia-Prinzip, Butcher 2014), wobei die Besonderheit im Fall digitaler Medien in der Integration verschiedener Medien (z. B. Bild und Ton) durch einen Computer besteht (Schulz-Zander & Tulodziecki 2002). Insgesamt erscheint im aktuellen Verständnis der Digitalität die Trennung zwischen analogen und digitalen Medien jedoch zunehmend schwieriger bzw. erscheint in den meisten Fällen gar obsolet (vgl. z. B. Peschel et al. 2023). Bereits vor fast zwei Jahrzehnten betonte Hüther (2005: 347 ff) mit den „neuen Medien“ deren Interaktivität und die damit einhergehenden Möglichkeiten zur (globalen) Vernetzung (gegenüber „traditionellen“ Medien). Heute stellt sich die Frage, ob

Medien wie Augmented Reality oder Virtual Reality, (s. Kapitel 1.3) oder – gerade seit 2023 auch Medien auf Basis von künstlicher Intelligenz (KI) die *neuen Medien* der Gegenwart darstellen.

Dass Medien Teil der Lebenswelt von Grundschulkindern sind, ist keine neue Entwicklung (vgl. z. B. Gervé 1998; Mitzlaff 2007; Neuß 2012). Die alle zwei Jahre vom Medienpädagogischen Forschungsverbund Südwest (mpfs) durchgeführte **KIM**-Studie (**K**indheit, **I**nternet, **M**edien, mpfs 2020) mit Kindern im Alter von sechs bis dreizehn Jahren (49 % Grundschulkindern, vgl. ebd.: 3) zeigt allerdings in 2020 nicht nur das bisher größte Interesse von Kindern an Smartphones, Internet, Computer und Onlinespielen (ebd.: 7), sondern mittlerweile auch eine Ausstattung von 99 % der befragten Haushalte mit Internet, Smartphone / Handy und Computer / Laptop (ebd.: 11), wobei die Hälfte der Kinder bereits ein eigenes Smartphone besitzt (ebd.: 12). Insbesondere aber die Ergebnisse zu Freizeitaktivitäten (s. Abb. 2) unterstreichen die intensive Mediennutzung der Kinder.

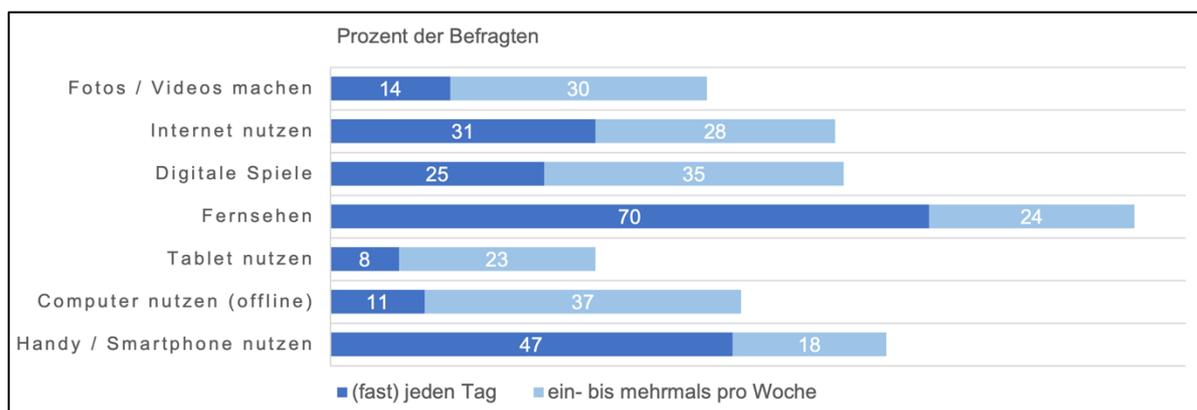


Abbildung 2: Auszug aus der KIM-Studie des mpfs (2020: 22f) zu Freizeitaktivitäten von Kindern zwischen sechs und dreizehn Jahren in Deutschland (eigene Darstellung).

1.1.2 Digitale Medien in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts)

Die Digitalisierung der Alltags- und Lebenswelt erfordert entsprechende neue Kompetenzen für die Teilhabe an der Lebenswelt. Von der Kultusministerkonferenz (KMK) wurden verbindliche Kompetenzen für Schülerinnen und Schülern (KMK 2017) sowie für Lehrkräfte (KMK 2019) formuliert. Entsprechende Beschlüsse wurden für die Länder abgeleitet – im Saarland z. B. durch das Ministerium für Bildung und Kultur (MBK) in Form des Landeskonzpts „Medienbildung in saarländischen Schulen“ (MBK 2017) und das „Basiscurriculum Medienbildung und informatische Bildung“ (MBK 2019). Fachgesellschaften wie die Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD), die Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) und Verbände wie der Grundschulverband (GSV) betonen allerdings, dass die von der KMK beschriebenen Kompetenzbereiche um weitere Bereiche ergänzt werden müssen und dass gleichzeitig eine fachliche Förderung medialer Kompetenzen sowie eine digitale

Förderung fachlicher Kompetenzen erfolgen muss (GDSU 2021; GFD 2018; Gesellschaft für Informatik, GI, 2019; GSV 2016).

Gervé und Peschel (2013) beschreiben die Dialektik des Lernens *mit* und *über* Medien (vgl. a. Peschel 2016, GDSU 2021). Im Verständnis eines Lernens *mit* Medien sind Medien „[...] die Werkzeuge und Transportmittel für Informationen in der Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen“ (Krautter 2015: 214) bzw. die „Mittler“ (Gervé & Peschel 2013: 59). In Lehr-Lern-Situationen zeichnen sich (digitale) Medien durch charakteristische pädagogisch-didaktische Gestaltungs- bzw. Lernmöglichkeiten aus (Peschel 2016: 7). Potenziale von (digitalen) Medien in Lehr-Lern-Situationen werden unter anderem in der Individualisierung von Lehr-Lern-Prozessen, der Förderung der Kommunikation und Kooperation der Lernenden sowie in der Ermöglichung von orts- raum- und zeitunabhängigem Lernen gesehen (vgl. z. B. Irion & Scheiter 2018; Schaumburg & Prasse 2018; Tulodziecki et al. 2021). Verschiedene Metaanalysen zeigen mittlere bis große Effekte von digitalen Medien in Lehr-Lern-Situationen (Chauhan 2017; Hillmayr et al. 2020; Tamim et al. 2011), wobei bei einer Ausdifferenzierung einzelner Medien teils gar große Effekte zu beobachten sind (Hattie 2017). Die Interpretierbarkeit bzw. die Gültigkeit dieser Ergebnisse für reale Lehr-Lern-Situationen ist allerdings stark eingeschränkt: Trotz hoher interner Validität ist die externe Validität der Ergebnisse (der einzelnen Studien wie auch der Metaanalysen) wegen der Komplexität, der Heterogenität und der Dynamik der in den Lehr-Lern-Situationen zugrundeliegenden Kontexte eher gering (Schulmeister 2007). Diese kontextuellen Faktoren erläutern beispielsweise Moskaliuk et al. (2018: 15) bzw. speziell für die Grundschule Irion & Ruber (2019).

Im Sinne des Lernens *über* Medien müssen aber auch Medien selbst im Unterricht adressiert werden, damit eine bewusste und kritische Auseinandersetzung mit den Wirkungen und Gefahren von (digitalen) Medien *in* der bzw. *für* die Lebenswelt stattfinden kann (Gervé & Peschel 2013: 61f). Im Besonderen muss deutlich werden, dass „[...] Freiheiten, Gewohnheiten und Abhängigkeiten, die mit der (rasanten und technischen) Medienentwicklung einhergehen, nicht naturgegeben, sondern von Menschen gemacht und damit veränderbar sind“ (ebd.: 62). Haider et al. (2022: 56) fügen hinzu, dass nicht nur Medien im Sinne des Lernens *über* Medien, sondern auch die Digitalisierung mit ihren gesellschaftlichen Implikationen (s. auch *Kultur der Digitalität*, Hauck-Thum 2021; Irion & Knoblauch 2021; Stalder 2016) selbst zum Lerninhalt werden muss.

Die beschriebene Dialektik des Lernens *mit* und *über* Medien (Gervé & Peschel 2013) sehen Peschel et al. (2023: 45 f) im Verständnis von Digitalität inzwischen sogar als überholt an bzw.

als zu diskutieren und weiterzuentwickeln an⁴ und schlagen den Begriff des *Lernens über Digitalisierung* (ebd.: 46) vor:

„Dabei beinhaltet *Lernen über Digitalisierung* natürlich das Lernen *über* Medien genauso wie das Lernen *mit* Medien und hat sowohl analoge als auch digitale Komponenten, die ein modernes Bildungsverständnis bzw. eine Digitale Grundbildung oder eine *digital literacy* erzeugt. In einem Wort: Bildung – in der Digitalität.“ (Peschel et al. 2023: 46)

Es zeigt sich – s. a. die beschriebene Problematik der Interpretierbarkeit von Medieneffekten aus Studien für die Praxis –, dass nicht unbedingt der Einsatz der Medien selbst, sondern deren pädagogisch-didaktische Einbettung in Lehr-Lern-Situationen Wirkung entfaltet (vgl. z. B. Wu et al. 2013; Peschel 2016, GFD 2018) bzw. den Diskurs der Orchestrierung von Lehr-Lern-Situationen bei Prieto et al. 2011; Weinberger 2018). Dementsprechend sind auch dichotome Mehrwert-Debatten bzgl. (digitalen) Medien in Lehr-Lern-Situationen nicht sinnvoll (vgl. z. B. Krommer 2019). Aus fachdidaktischer Perspektive können (digitale) Medien also nur sinnvoll in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden durch Aushandlung zwischen den Lernzielen, den Spezifika der Lehr-Lern-Situation bzw. den Adressatinnen und Adressaten und den technischen und pädagogisch-didaktischen Möglichkeiten und Grenzen des einzusetzenden (digitalen) Mediums: Hieraus ergibt sich eine fachdidaktische Rekonstruktion (Duit et al. 2012; Kattmann et al. 1997) unter Einbezug des Mediums erfolgen, also eine *fach-medien-didaktische Rekonstruktion* (Peschel 2016; Lauer & Peschel 2020). Die Notwendigkeit zu einer fach-medien-didaktischen Rekonstruktion zeigt sich auch (zumindest) in Ansätzen im ergänzenden Papier der KMK „Lehren und Lernen in der digitalen Welt – Ergänzung zur Strategie der Kultusministerkonferenz ‚Bildung in der digitalen Welt‘“ (KMK 2021). Dass in Lehr-Lern-Situationen der Fokus also nicht auf den Medien, sondern auf dem Lernen liegt, zeigt auch der Begriff „*Mediales Lernen*“ (Peschel 2016: 9) im Verständnis einer *inkluisiven Mediendidaktik* (ebd.: 8).

Die hier vorgenommene Zuspitzung zu einem fach-medien-didaktisch rekonstruiertem Einsatz (digitaler) Medien zeigt sich insbesondere für die Grundschule: Einerseits ist es die Aufgabe der Grundschule, insbesondere des Sachunterrichts, Bildung zu erzeugen, die die Kinder in ihrer Entwicklung und in der Teilhabe am gesellschaftlichen Zusammenleben unterstützt (GDSU 2013; 2021; Götz 2022). Entsprechende von der KMK (2017; 2021) formulierte Bildungsaspekte sollen bereits im Grundschulalter angebahnt werden. Die Lebenswelt der

⁴ Da die hier beschriebene Entwicklung um den Begriff der *Digitalität* erst gegen Ende dieser Arbeit aufkam, wird sowohl in den Publikationen der Dissertationsschrift als auch im begleitenden Text weiterhin auf die Dialektik des Lernens *mit* und *über* Medien (Gervé & Peschel 2013) Bezug genommen.

Grundschülerinnen und Grundschüler ist – wie oben gezeigt – heutzutage besonders von Digitalität geprägt, die Kinder sind sogar in der Digitalität aufgewachsen und werden als „*digital natives*“ (vgl. z. B. Bennett et al. 2008: 775) bezeichnet. Gleichzeitig ist auch der daran angelehnte Begriff „*digital natives*“ zu diskutieren angesichts der Gefahr des unreflektierten Umgangs mit Medien bzw. speziellen Aspekten der Digitalität wie der Umgang mit eigenen Daten im Internet (Bach et al. 2023). Daher bedarf es einer pädagogischen Begleitung und einer kindgerechten Heranführung an (digitale) Medien und Digitalität unter Berücksichtigung fachlicher sowie medialer Kompetenzen (GFD 2018; Gervé & Peschel 2013; Peschel 2016).

Die reale Situation an Grundschulen steht allerdings oft in erheblicher Diskrepanz zur Lebens- und Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler, da insbesondere in Grundschulen wenig bis kaum digitale Medien eingesetzt oder adressiert werden bzw. überhaupt vorhanden sind (Gervé 2015; Gläser & Krumbacher 2021: 159 ff). Deswegen forderten beispielsweise bereits der GSV (2016), der Vorstand der Sektion Medien Medienpädagogik der Deutschen Gesellschaft für Erziehungswissenschaft (DGfE) et al. (2020) oder die DGfE-Kommission Grundschulforschung und Pädagogik der Primarstufe (2022) eine höhere und effektivere Medienausstattung und Medienzugänglichkeit für Grundschulen sowie eine umfassende Weiterqualifikation der Lehrkräfte, damit entsprechende Kompetenzen bei Grundschülerinnen und Grundschülern auch angebahnt werden können. Insbesondere im Sachunterricht muss aufgrund seiner Lebensweltorientierung (GDSU 2013: 10) eine vielperspektivische⁵ Adressierung von Digitalität stattfinden (GDSU 2021; Gervé 2022; Peschel et al. 2023). Hier besteht ein erhebliches Desiderat zur Erforschung, Entwicklung und Erprobung fach-medien-didaktisch rekonstruierter Lehr-Lern-Szenarien zu digitalen Medien bzw. Aspekten von Digitalität, welches mit dieser Dissertation teilweise geschlossen werden soll.

1.2 Modellierungen zum Einsatz (digitaler) Medien (im Sachunterricht)

Zum Einsatz (digitaler) Medien in Lehr-Lern-Situationen existieren einerseits diverse Modellierungen zu Kompetenzen für Lehrende, z. B. das TPaCK- (Koehler & Mishra 2009) oder DPaCK- (Thyssen et al. 2023) Modell als Weiterentwicklungen des PCK-Modells (Shulman 1986) sowie das Modell der medienbezogenen Lehrkompetenzen (Haider & Knoth 2021; Haider et al. 2022). Weiterhin gibt es Modellierungen zu Kompetenzen für Lernende, z. B. die Kompetenzraster der KMK (2017) aus Kapitel 1, das RANG-Modell (Irion et al. 2023), das Goldauer Würfelmodell (Mitzlaff 2010; Schrackmann et al. 2008) sowie

⁵ Wie bereits beschrieben wurde, findet eine vielperspektivische (GDSU 2013) Rekonstruktion bzw. Einbettung im Rahmen der Dissertation nicht statt. Insgesamt müssen daher die diskutierten Modellierungen und die gewonnene Studienergebnisse im Rahmen anschließender Arbeiten um Aspekte von Vielperspektivität ergänzt bzw. in diesem Kontext ggf. neu interpretiert und bewertet werden (vgl. auch Kapitel 3).

das daraus adaptierte Würfelmodell von Peschel (2016). Darüber hinaus gibt es zahlreiche Modellierungen, die den Einsatz der Medien selbst fokussieren: Das interdisziplinär ausgerichtete Dagstuhl-Dreieck (GI 2016) bzw. dessen Weiterentwicklung, das Frankfurter Dreieck (Brinda et al. 2019), eröffnen verschiedene Sichtweisen auf Medien und / oder Digitalität (technologische, gesellschaftlich-kulturelle und anwendungsbezogene Perspektive bei GI 2016: 3 bzw. technologisch-mediale, gesellschaftlich-kulturelle Perspektive und Interaktionsperspektive Brinda et al. 2019: 3). Aufgrund der Fokussierung auf Medien müssen diese Modellierungen im jeweiligen Fachunterricht im Sinne adaptiert und differenziert bzw. erweitert werden (Bach 2018; GFD 2018; GDSU 2021).

Speziell für den Sachunterricht systematisiert das Modell Mediales Lernen Sachunterricht (Gervé & Peschel 2013; Peschel 2016: 11) Begriffe des Medialen Lernens unter Berücksichtigung des parallelen Lernens *mit* und *über* Medien. Als praxisnahe Modellierung für den Sachunterricht kann das Kreismodell der AG Medien & Digitalisierung der GDSU (Peschel 2016) herangezogen werden: Medien und vor allem Digitalität können als Perspektivenvernetzender Themenbereich Ausgangspunkt einer perspektivenvernetzenden und vielperspektivischen Auseinandersetzung sein (Kunkel & Peschel 2020). Modellierungen zum fach-medien-didaktisch rekonstruierten Einsatz oder zur Reflexion dieses Einsatzes von (digitalen) Medien fehlen bislang.

Bei Betrachtung (schulischer) Lehr-Lern-Situationen aus der Sicht von Angebot und Nutzung (vgl. z. B. Angebots-Nutzungs-Modellierung von Helmke 2015) beschreibt beispielsweise das iPAC-Modell (vgl. z. B. Kearney et al. 2012) verschiedene Indikatoren zur Charakterisierung bzw. zur Evaluation des Einsatzes digitaler Medien bzgl. verschiedener Unter Aspekte mit dichotomen Skalen, während das SAMR-Modell (Puentedura 2006) durch seine hierarchische Ebenen-Struktur Vorteile digitaler (neuer) Medien gegenüber bestehenden Medien fokussiert.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln herausgestellt wurde, müssen ausschließlich medienbezogene Modellierungen im Verständnis einer fach-medien-didaktischen Rekonstruktion erweitert werden. Weiterhin sind Mehrwerts-Vergleiche von Medien unter Vernachlässigung des Kontexts, wie sie das SAMR-Modell induziert (Hamilton et al. 2016), nicht sinnvoll (s. Kapitel 1.1). Eine Modellierung im Kontext des Medialen Lernens, welche eine differenziertere Betrachtung des Einsatzes (digitaler) Medien in fachorientierten Lehr-Lern-Situationen erlaubt, ist das „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2022, vgl. Abb. 3). Die im Zentrum des Modells stehende *Usefulness* (Nützlichkeit) einer (wörtlich übersetzt) Lehr-Lern-Umgebung setzt sich aus einer technischen Komponente, der *Usability* (Benutzbarkeit) und einer pädagogisch-didaktischen Komponente, der *Utility* (Nutzen) zusammen. Die *Utility* teilt sich

nochmals in die *Pedagogical Usability* (Benutzbarkeit für pädagogisch-didaktische⁶ Zwecke) und den *Value Added* (Mehrwert). Das Modell erlaubt also eine kategoriengeleitete, differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung technischer und pädagogisch-didaktischer Benutzbarkeit: Aspekte wie technische Benutzbarkeit, Mehrwert und Benutzbarkeit für pädagogisch-didaktische Zwecke werden somit nicht isoliert fokussiert, sondern bei Evaluationen des Medieneinsatzes entlang dieses Modells gehen die genannten Aspekte gleichsam in die summative Bewertung der *Usefulness* ein. Somit ist es auch legitim, wenn sich Medien bzgl. der genannten Aspekte als unterschiedlich gut erweisen.

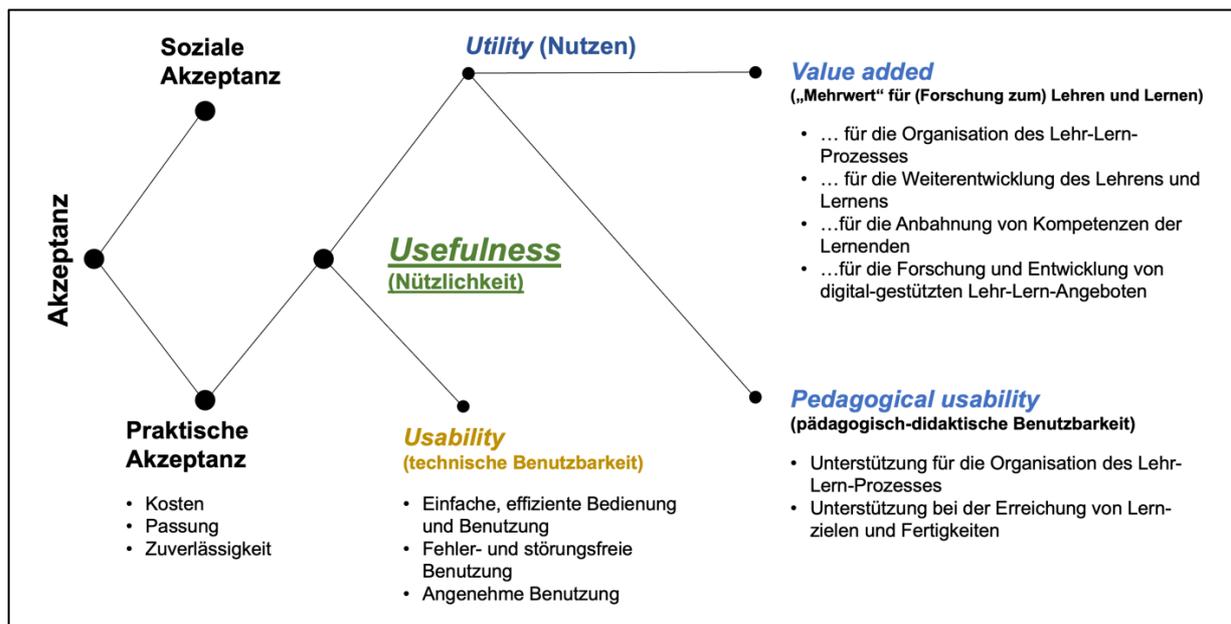


Abbildung 3: Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments von Nielsen (1993), überarbeitet von Silius & Tervakari (2002), eigene Darstellung, eigene Übersetzungen und eigene Ergänzungen.

Zwischenfazit 1

Insgesamt zeigt sich eine Notwendigkeit zur **fach-medien-didaktischen Rekonstruktion** des Einsatzes (digitaler) Medien in Lehr-Lern-Situationen des Sachunterrichts. Der beschriebene Ansatz der **Usefulness** bietet im Kontext Medialen Lernens eine neue Perspektive auf bestehende „Mehrwert-Debatten“: Er ermöglicht eine kategoriengeleitete Beurteilung jedes medial gestützten Lehr-Lern-Angebots, welche für sich selbst stehen kann und keinen Medienvergleich erfordert (wenngleich er auch für Medienvergleiche innerhalb einer Kategorie herangezogen werden könnte).

⁶ Im späteren Verlauf der Arbeit (s. Kapitel 2.3) wird diskutiert, inwieweit eine Übersetzung als (ausschließlich) „pädagogisch“ hier unzureichend erscheint.

1.3 Augmented Reality (AR)

1.3.1 Technische Spezifikation von AR-Technologie(n)

Begriffsdefinition

Unter AR wird die Erweiterung der realen Wahrnehmung in Echtzeit durch räumlich und / oder semantisch verschränkte virtuelle (= durch ein spezielles Gerät digital erzeugte und der Realität hinzugefügte) Objekte bzw. Informationen verstanden (Azuma et al. 2001: 34). Diese Definition ergänzen Dörner et al. (2019: 29) um weitere Sinneskanäle (z. B. auditive Erweiterungen) und betonen den Aspekt der Wahrnehmung, da sich virtuelle Objekte in AR im Idealfall so verhalten wie reale Objekte:

„*Augmentierte Realität (AR)* ist eine (unmittelbare und interaktive) um virtuelle Inhalte (für beliebige Sinne) angereicherte Wahrnehmung der realen Umgebung in Echtzeit, welche sich in ihrer Ausprägung und Anmutung soweit wie möglich an der Realität orientiert, sodass im Extremfall (so dies gewünscht ist) eine Unterscheidung zwischen realen und virtuellen (Sinnes-) Eindrücken nicht mehr möglich ist.“ (ebd.: 29)

Im Gegensatz zu (augenscheinlich) ähnlichen Technologien wie Virtual Reality (VR) fokussiert AR die Realität als Hauptbezugsebene (Milgram & Kishino 1994) aus, die permanent wahrgenommen werden kann und die durch die virtuellen Elemente lediglich ergänzt bzw. teilweise überlagert wird. Das Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum von Milgram et al. (1995, vgl. Abb. 4) verdeutlicht, dass Technologien der Verschmelzung von Realität und Virtualität, hier speziell AR, je nach Anteil der Virtualität in der Realität (oder der Realität in der Virtualität) in einem gewissen Bereich eines Kontinuums mit fließenden Übergängen zu verorten sind. Virtualität meint dabei eine vollständig virtuelle Umgebung.

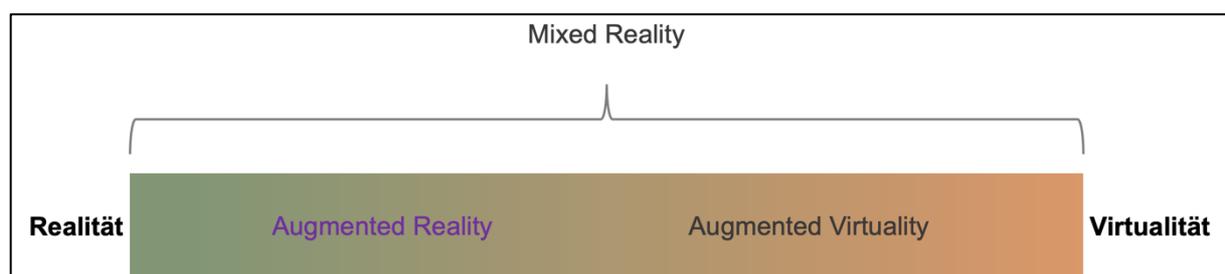


Abbildung 4: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram et al. (1995), eigene Darstellung.

Im Rahmen der Dissertation wird der Begriff *Augmentierungen* als Bezeichnung für die virtuellen Objekte bzw. Informationen verwendet, die in der Wahrnehmung der realen Umgebung ergänzt werden. Ebenso wird „to augment“ im Sinne der wörtlichen Übersetzung als eine zunächst rein quantitative Erweiterung. Mit einem solchen Verständnis von AR ist

gemeint, dass die virtuellen Inhalte in AR die Realität (zunächst lediglich) quantitativ anreichern und dass diese quantitative Anreicherung nicht unbedingt eine qualitative Anreicherung implizieren muss.

Arten von AR-(Visualisierungs-)Technologien

Geräte, die AR erzeugen, klassifizieren Schmalstieg & Höllerer (2017: 59ff) anhand ihrer Nähe zum Auge (vgl. Abb. 5). In dieser Dissertation werden AR-Technologien fokussiert, die in gewisser Weise mit dem Körper der betrachtenden Person verbunden sind (Kopf oder Körper / Hand).

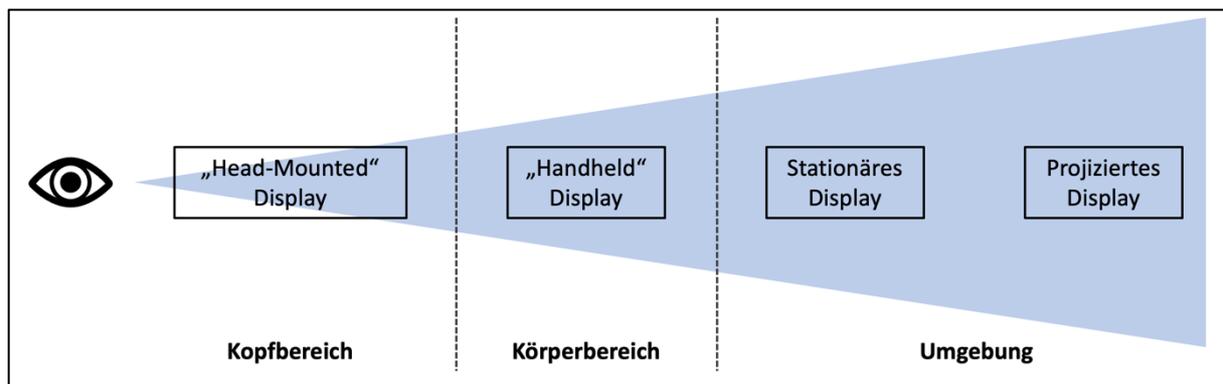


Abbildung 5: Klassifikation von AR-Technologien nach Schmalstieg & Höllerer (2017: 59). Adaptierte Darstellung, eigene Übersetzungen.

Im Bereich der Head-Mounted Displays (HMD, Brillen⁷) lässt sich aus technischer Sicht grundsätzlich zwischen Optical See-Through (OST) und Video See-Through (VST) unterscheiden (Dörner et al. 2019: 173, 320; Schmalstieg & Höllerer 2017: 40 ff). Während bei OST die Realität durch (halb-)transparente Displays direkt wahrgenommen werden kann, wird bei VST die Realität als Echtzeit-Video-Replikation über einen undurchsichtigen Bildschirm übertragen (Schmalstieg & Höllerer 2017: 66 ff). Dies hat zwar den Vorteil, dass die virtuellen Objekte in VST-AR mit deutlicherer Farbwahrnehmung und höheren Kontrasten angezeigt werden (Dörner et al. 2019), allerdings ist das Sichtfeld bzgl. Weite und Zoom abhängig von der Kamera, über die die Replikation der Realität erzeugt wird. Zudem wird die OST-AR-Technologie stetig weiterentwickelt – eine der derzeit führenden OST-AR Technologien findet sich in Microsoft's HoloLens 2 (s. z. B. Janssen 2019).

Bezogen auf die Klassifikation in Abb. 5 lässt sich AR in der Kamerasicht von Smartphones oder Tablets der Handheld-Display (HHD) -Technologie zuordnen. Eine technische

⁷ In weiteren Verlauf dieser Arbeit werden je nach Kontext die Begriffe HMD-AR, Brillen-AR bzw. AR-Brillen verwendet, wenn AR durch Head-Mounted Displays erzeugt wird.

Kategorisierung von „See-Through“-Displays (Schmalstieg & Höllerer 2017: 44) ordnet auch diese Form von AR den VST-Displays zu im Sinne eines monokularen AR-Displays, dem binokulare AR-Displays im klassischen Brillen-Verständnis gegenüberstehen. Abb. 6 zeigt eine detaillierte Gegenüberstellung der in diesem Abschnitt beschriebenen AR-Technologien. Insbesondere werden fortan zur besseren Lesbarkeit die folgenden Bezeichnungen geführt:

- „AR-Brillen“ bzw. „Brillen-AR“ für die HMD-OST-AR
- „AR-Tablet“ bzw. „Tablet-AR“ für die HMD-VST-AR

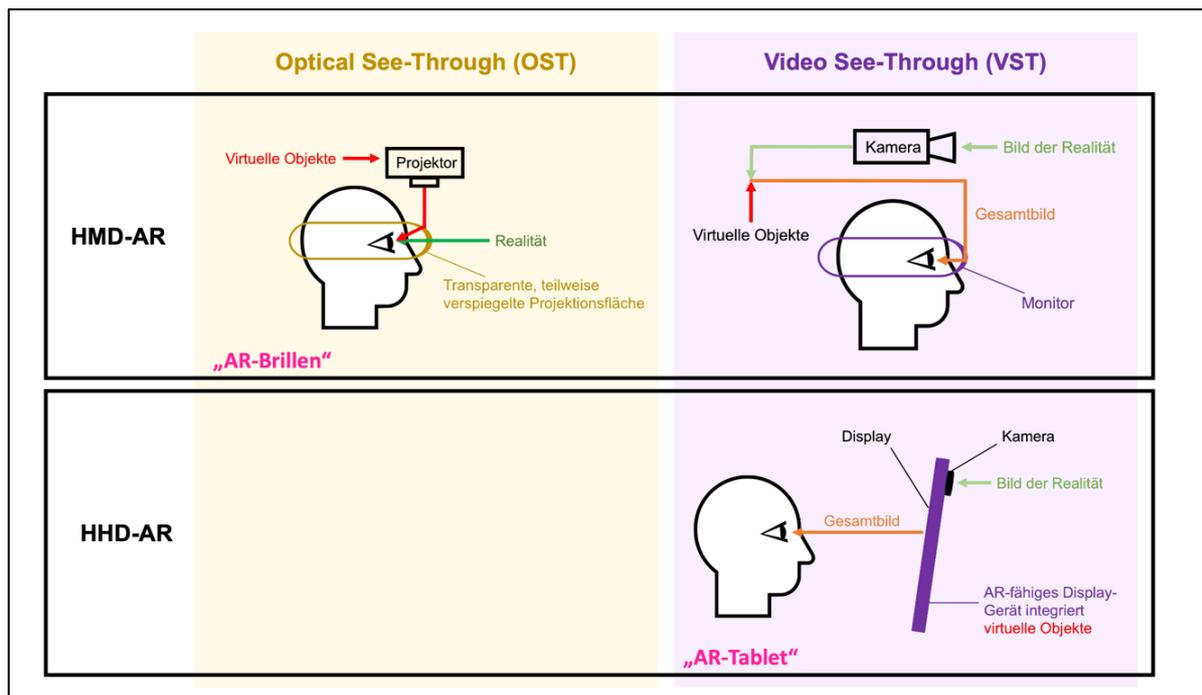


Abbildung 6: Gegenüberstellung der in diesem Abschnitt beschriebenen AR-Technologien. Darstellungen der einzelnen Technologien teilweise adaptiert bzw. verändert nach Rushdi 2017 und Kiyokawa et al. 2000 mit eigenen Übersetzungen und eigenen Ergänzungen.

Aus technischer Sicht ist zu beachten, dass je nach Verfügbarkeit gewisser Kameraeinstellungen in AR bei Smartphones oder Tablets die Kamerasicht sich bzgl. Perspektive oder Zoom nicht genau in die reale Ansicht einfügt. Zudem nimmt die Tablet-AR stets nur einen kleinen Teil des Blickfeldes ein. Beides hat zur Folge, dass die empfundene Immersion bei Tablet-AR tendenziell geringer ausfällt als bei Brillen-AR (Dörner et al. 2019: 333). Vor allem aus didaktischer Sicht (s. a. Kapitel 1.3.3) ist allerdings fraglich, inwieweit eine digitale Replikation der Realität in der Kamerasicht eines Displays – insbesondere bei Tablet-AR – tatsächlich als „See-Through“ bezeichnet werden sollte.

Zur technischen Realisierung von AR sind müssen noch weitere Aspekte zu bedacht bzw. weitere Schritte technisch realisiert werden (z. B. Tracking, Registrierung, etc.), welche im vorherigen Absatz noch nicht beschrieben wurden. Da aus pädagogisch-didaktischer Wirkungsperspektive zunächst das Resultat von Interesse ist, übersteigen diese weiteren

technischen Vorgänge den Rahmen der Dissertation und an dieser Stelle sei auf einschlägige Literatur verwiesen, die weitere Aspekte und Prozesse detailliert beleuchtet (vgl. z. B. Dörner et al. 2019, Schmalstieg & Höllerer 2016).

1.3.2 AR in der Lebenswelt von Grundschulkindern

Die KIM KIM-Studie (mpfs 2020: 20) zeigt bezüglich der Smartphonennutzung von Kindern, dass sowohl Snapchat (Platz 5) als auch TikTok (Platz 2) zu den am meisten genutzten Apps zählen. Beide Apps verfügen über die bekannten Filter, durch die beispielsweise das reale Gesicht einer Person in der Kamerasicht des Geräts scheinbar optisch verändert wird. Auch in anderen Bereichen des Alltags kommen bereits Grundschulkindern mit AR in Kontakt bzw. werden damit in Kontakt kommen, beispielsweise bei Spielen wie Pokémon Go oder bei der Echtzeit-Navigation mittels Kamerasicht bei Kartendienst-Anwendungen auf dem Smartphone. Auch Werbeplakate werden immer öfter mit AR versehen (Mehler-Bicher & Steiger 2014). Wie bereits in der Einleitung beschrieben (Kapitel 1, Seite 1), wird AR sicherlich im späteren Berufsalltag jetziger Grundschulkindern von Relevanz sein.

Insgesamt scheint bereits der jetzige und mit Sicherheit auch der zukünftige Alltag von Grundschulkindern immer mehr durch AR geprägt zu sein (auch wenn dies ggf. nicht als „AR“ wahrgenommen wird). Somit besitzt AR *Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung* (Irion 2018; Klafki 2007) für Grundschulkindern.

1.3.3 AR in Lehr-Lern-Situationen

Pädagogisch-didaktisches Potenzial

In der Analyse bestehender Produktangebote fällt auf, dass es viele „gebrauchsfertige“ und für den Bildungsbereich gedachte AR-Anwendungen oder -Tools zu geben scheint, bei denen dreidimensionale Objekte (z. B. Modelle von Tieren oder Planeten) in der Realität visualisiert werden – allerdings ohne *Verschränkung* mit der Realität. Dies führt dazu, dass die Realität als (laut Definition von AR) eigentliche Hauptbezugsebene für die Betrachtung der in AR sichtbaren Objekte obsolet wird. Dabei liegt doch das eigentliche, sich aus den genannten technischen Spezifika ergebende pädagogisch-didaktische Gestaltungscharakteristikum von AR in der *gleichzeitigen* Wahrnehmung von Realität und vor allem einer Interaktion mit virtuellen Objekten (Dunleavy 2014). Außerdem wird bzgl. der *Verschränkung* oft nur der räumliche Aspekt adressiert:

- *Räumliche Verschränkung*: Realobjekte und dazugehörige virtuelle Objekte sind räumlich verschränkt, wenn die virtuellen Objekte sich stets an der gleichen Position im realen Raum zu befinden scheinen wie die Realobjekte.

- *Zeitliche Verschränkung*: Realobjekte und dazugehörige virtuelle Objekte sind zeitlich verschränkt, wenn die virtuellen Objekte in Echtzeit auf Veränderungen der Realobjekte reagieren.
- *Semantische Verschränkung*: Realobjekte und dazugehörige virtuelle Objekte sind semantisch verschränkt, wenn ein sinnhafter Zusammenhang zwischen den Realobjekten und den virtuellen Objekten besteht

Die nahezu ausschließliche Adressierung der räumlichen Verschränkung war besonders zu Beginn des Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen der Fall, als meist lediglich Zusatzinformationen an realen Objekten ergänzt wurden (Dede 2009).

Aus pädagogisch-didaktischer Sicht sind durch die Möglichkeit der Echtzeit-Interaktion in AR bzw. durch Echtzeit-Anpassung der Virtualität an die Realität adaptive Lehr-Lern-Umgebungen in AR (Anderson & Anderson 2019) denkbar. AR kann außerdem eingesetzt werden, um multiple Repräsentationen räumlich und zeitlich zu verschränken (Radu & Schneider 2019). Außerdem können Prozesse oder Phänomene sichtbar oder sichtbar gemacht werden, welche mit den Sinnen nicht wahrnehmbar bzw. nicht beobachtbar sind (Dunleavy et al. 2009; Wu et al. 2013). Krug et al. (2021: 2486 ff) beschreiben verschiedene Design-Kriterien von AR-Anwendungen für den (naturwissenschaftlichen) Bildungsbereich: „Immersion“, „Interactivity“, „Congruence with Reality“, „Adaptivity“, „Game Elements“, „Complexity“ und „Content proximity to reality“. Aufgrund der beschriebenen pädagogisch-didaktischen Gestaltungscharakteristika kann AR als („eigenständiges“) Medium in Lehr-Lern-Situationen aufgefasst werden (Peschel 2016).

Forschung zur Wirkung von Multimedia in Lehr-Lern-Situationen hat gezeigt, dass multimediale Technologien durch die (semantische) Verbindung von digitalen und physischen Objekten die kognitive Verarbeitungstiefe erhöhen können. Zudem können sie kritisches Denken fördern sowie die Problemlösungsfähigkeit und Kommunikation der Lernenden verbessern (Dunleavy et al. 2009). Daher sind die genannten Effekte auch für den Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen zu erwarten.

Die Einsatzmöglichkeiten von AR in Lehr-Lern-Situationen können aus medienpädagogischer, mediendidaktischer und fachdidaktischer Sicht also wie folgt charakterisieren bzw. differenziert werden:

- Medienpädagogische Sicht: Die Medienpädagogik fokussiert in Bezug auf Medien erzieherische, persönlichkeitsbildende Charakteristika (vgl. z. B. Irion 2016; Sander et al. 2008; s. a. Verortung im Modell Mediales Lernen im Sachunterricht, Gervé & Peschel 2013)

- Bezogen auf das Medium AR könnten eine Individualisierung des Lernprozesses sowie die Schaffung einer adaptiven Lehr-Lern-Umgebung mögliche medienpädagogische Gestaltungscharakteristika von AR sein (vgl. Lauer & Peschel 2020)
- Mediendidaktische Sicht: Die Mediendidaktik formuliert Kriterien zur Analyse des Einsatzes von Medien bzw. zur Auswahl und Entwicklung von Medien (vgl. z. B. Kerres 2008; s. a. Verortung im Modell Mediales Lernen im Sachunterricht, Gervé & Peschel 2013).

→ Bezogen auf das Medium AR könnte die Echtzeit-Einblendung virtueller Informationen an räumlich, zeitlich oder semantisch verknüpften (s. o.) realen Objekten ein mögliches mediendidaktisches Gestaltungscharakteristikum von AR sein (vgl. Lauer & Peschel 2020).
 - Fachdidaktische Sicht (vgl. z. B. GFD 2018): Aus fachdidaktischer Sicht muss einerseits eine mediale Unterstützung fachlichen Lernens erfolgen (Lernen *mit* Medien, Peschel 2016). Gleichzeitig muss aber auch das Lernen über Medien (Peschel 2016) fachlich grundgelegt sein.

→ Der Einsatz des Mediums AR wird aus fachdidaktischer Perspektive also im Rahmen einer fachdidaktischen Rekonstruktion (vgl. z. B. Duit et al. 2012) unter Einbezug des Mediums. Das bedeutet, es erfolgt eine Aushandlung zwischen technischen Spezifika von AR und den jeweils zugrunde liegenden Anforderungen des Fachinhaltes der Lehr-Lern-Situation (vgl. Lauer & Peschel 2020).

Bzgl. der im Bildungsbereich verwendeten AR-Technologien zeigen Akçayır & Akçayır (2017) in ihrem Review, dass Tablet-AR sowie – vorwiegend im Bereich der beruflichen Bildung – Brillen-AR die am meisten verwendeten AR-Technologien darstellen. Tablet-AR eignet sich auf den ersten Blick sicher aus ökonomischen Gründen für den Einsatz in der Schule, da die Geräte und deren Benutzung und Bedienung den Lernenden aus ihrem Alltag weitgehend bekannt sind. Außerdem sind AR-Brillen derzeit noch sehr teuer und es gibt für sie noch eher wenige Anwendungen für den (nicht-berufsbildenden) Bildungsbereich (ebd.).

Die genannten AR-Technologien unterscheiden sich nicht nur in ihrer Handhabung: Es werden insbesondere auch unterschiedliche (Kombinationen von) Objektrepräsentationen (Ainsworth 2006; Schnotz & Bannert 2003) in AR wahrgenommen: In der Brillen-AR werden scheinen die virtuellen Objekte in die reale Umgebung integriert zu sein. In der Tablet-AR sind die virtuellen Objekte hingegen in einer digitalen Kopie der Realität integriert (vgl. a. konkret-ikonische Repräsentation, Purchase 1998). Wie bereits in Kapitel 1.3.1 beschrieben, stimmen im Gegensatz zur Brillen-AR hier auch mitunter die Perspektive der Kamerasicht und die der realen Umgebung nicht unbedingt überein. In Vorstudien zur Pilotierung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten AR-Lehr-Lern-Tools beobachteten wir nicht zuletzt immer wieder, dass

viele Kinder das Tablet zur Seite legten oder am Tablet vorbeischaute, wenn sie die realen Gegenstände vor ihnen betrachten wollten – wenngleich sie auch die Kamerasicht des Tablets hätten verwenden können. Es besteht also ein Unterschied zwischen Brillen-AR (Einblendung virtueller Objekte in der Realität) und Tablet-AR (Einblendung in einer digitalen Kopie der Realität) (vgl. a. Lauer et al. 2021). In Lehr-Lern-Situationen könnte dieser Unterschied von großer Bedeutung sein: Eine AR-Visualisierung, wie sie AR-Brillen erlauben, birgt ein hohes Potenzial zur Verschmelzung der Realität mit den virtuellen Objekten und erlaubt durch die dauerhafte Fixierung auf dem Kopf, dass das Gerät in den Hintergrund der Wahrnehmung tritt (vgl. Publikation 8, Seite 28). Im Gegensatz dazu verbleibt ein in der Hand gehaltenes oder am Tisch fixiertes Smartphone oder Tablet stets als wahrnehmbarer „Mittler“ zwischen den realen Objekten sowie den Nutzerinnen und Nutzern (also den Lernenden) (vgl. ebd.). Damit dieser vermutete Vorteil von Brillen-AR gegenüber Tablet-AR auch tatsächlich zum Tragen kommen bzw. beobachtet werden könnte, müsste selbstverständlich eine ausreichende technische (Weiter-)Entwicklung von AR-Brillen bezüglich der technischen Bedienung und Benutzung sowie bezüglich der Erschwinglichkeit erfolgen.

Kognitionspsychologische Theorien

Aus kognitionspsychologischer Sicht finden im Kontext von AR in Lehr-Lern-Situationen insbesondere die Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML, Mayer 2005) und die von Moreno (2006) vorgeschlagene Erweiterung (CATML) sowie die Cognitive Load Theory (CLT, Plass et al. 2010; Sweller et al. 2011) Anwendung. Die CTML und die CLT finden Anwendung bei der Konzeption oder Analyse des Designs einer AR-Anwendung zur Adressierung bzw. Erklärung von Wissens- oder Fertigkeitserwerb. AR-Lehr-Lern-Anwendungen bzw. -Tools stellen gemäß der CTML eine Kombination von Repräsentationen bereit, die bei den Lernenden aktive kognitive Verarbeitungsprozesse initiiert. Somit ist zunächst davon auszugehen, dass durch die Integration multipler Repräsentationen in AR der Lernprozess unterstützt wird – im Gegensatz zu einer getrennten Darbietungsform (vgl. Ainsworth 2006). Die CLT beschreibt den Zusammenhang zwischen der kognitiven Belastung beim Lernen und dem Lernerfolg unter Berücksichtigung von Faktoren (der Darstellungsform) des Lehr-Lern-Materials und des Lernenden, welche auf die kognitive Belastung Einfluss nehmen. Die Grundannahme besteht in der Begrenztheit der Verarbeitungskapazität des Arbeitsgedächtnisses beim Lernen, wobei eine Abhängigkeit des Lernerfolgs von der Effizienz der Nutzung dieser vorhandenen Ressourcen des Arbeitsgedächtnis beschrieben wird. Zu solch einer effizienten Nutzung dieser begrenzten Ressourcen müssen irrelevante kognitive Verarbeitungsprozesse durch das Lehr-Lern-Material (extraneous cognitive load) bzw. hier durch die AR-Anwendung minimiert werden (Sweller 1994; Sweller & Chandler 1994). Die CATML ergänzt sich auf den Lernprozess und -Erfolg auswirkende affektive und motivationale

Faktoren sowie metakognitive und selbstregulatorische Fähigkeiten. Außerdem ergänzt sie individuelle Unterschiede zwischen den Lernenden bzgl. kognitiver Stile, Vorwissen, Fähigkeiten oder Persönlichkeitsmerkmale als weitere Einflussfaktoren (Moreno 2006).

Empirische Befunde

Verschiedene Review-Studien, z. B. von Avila-Garzon et al. (2021), Akçayır & Akçayır (2017), Herpich et al. (2019) und López-Belmonte et al. (2019) zeigen seit etwa 2011 einen Trend zu vermehrter Forschung und Entwicklung zu AR im Bildungsbereich. Avila-Garzon et al. (2021: 17) folgern, dass das AR an Bedeutung für den Bildungsbereich gewonnen hat und dort kurz vor einer breiten Anwendung stehen könnte. Die meisten Studien zu AR im Bildungsbereich fokussieren das Lernen *mit* (vgl. Peschel 2016) AR und untersuchen den Lernerfolg bzw. die Motivation der Lernenden beim Einsatz von AR (Arici et al. 2019: 12). Während weitgehend konsistente Befunde vorliegen, die auf eine Steigerung der Motivation durch den Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen schließen lassen (vgl. z. B. Bacca et al. 2018; Di Serio et al. 2013; Radu 2014), scheint bzgl. des Lernerfolgs insbesondere die pädagogisch-didaktische Einbettung von AR entscheidend zu sein (Garzón et al. 2020; Wu et al. 2013). Der Einsatz von AR kann den Lernerfolg verbessern (Akçayır & Akçayır 2017; Vázquez-Cano et al. 2020; Garzón & Acevedo 2019) und die langfristige Erinnerung an Gelerntes verbessern (Alzahrani 2020; Radu 2014). Des Weiteren zeigte AR in einigen Studien positive Auswirkungen auf die Zusammenarbeit unter den Lernenden (Alzahrani 2020; Billinghamurst et al. 2002; Radu 2014; Yuen et al. 2011). In einigen Studien konnten beim Einsatz von AR außerdem Steigerungen von Neugierde (Kuhn et al. 2016) oder eine Verbesserung der Einstellungen in Bezug auf das Fach (Akçayır et al. 2016) beobachtet werden. Meta-Analysen zeigten bislang einen mittleren Effekt von AR im Bildungsbereich (Garzón et al. 2020; Tekedere & Göker 2016), wobei dieser Effekt aus einem Zusammenwirken verschiedener Variablen im Rahmen der untersuchten AR-Interventionen zustande kommt (Garzón et al. 2020). Umso wichtiger erscheint angesichts dieses Ergebnisses die bereits erwähnte pädagogisch-didaktische, fach-mediale Fundierung des Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen gegenüber dem Einsatz von AR an sich.

Ein weiterer großer Forschungsbereich beschäftigt sich mit der Wirkung von AR auf die kognitive Belastung (vgl. Cognitive Load Theory (CLT), Plass et al. 2010; Sweller et al. 2011). Entsprechend der Ausführungen zur CLT besteht die Annahme, dass AR verschiedene visuelle Informationskanäle integrieren und somit die kognitive Belastung der Lernenden reduzieren kann (vgl. Altmeyer et al. 2020: 3). Kuhn et al. (2016) zeigten diesen Effekt für Brillen-AR-Unterstützung mit beim Experimentieren; Altmeyer et al. (2020) und Thees et al. (2020) erhielten ähnliche Befunde für Tablet-AR. Verschiedene Reviews zeigen, dass kognitive Überlastung dennoch weiterhin eine der zentralen Herausforderungen des

Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen darstellt (vgl. z. B. Alzahrani 2020). Dies scheint insbesondere bei Brillen-AR der Fall zu sein (Buchner et al. 2021). Die Autoren (ebd.) betonen in ihrem Review, dass anstelle der derzeit noch oft durchgeführten Vergleichsuntersuchungen zur kognitiven Belastung (AR-Bedingung vs. non-AR-Bedingung) eher Untersuchungen angestellt werden sollten, welche die individuellen Vorerfahrungen und -Fähigkeiten der Lernenden berücksichtigen.

Wie beschrieben, sollte eine zusätzliche kognitive Belastung der Lernenden durch das verwendete Lehr-Lern-Material oder die verwendeten Geräte minimiert werden. Für den Einsatz von AR Lehr-Lern-Situationen bedeutet dies, dass weder die Bedienung und Benutzung des AR-Geräts noch die Visualisierung in AR immense kognitive Ressourcen der Lernenden vereinnahmen sollten. Solche technischen Aspekte der Bedienung und Benutzung von Technologie werden unter der Usability (Nielsen 1990; 1993) zusammengefasst. Während (AR-)Technologien bzw. -Geräte mit guter Usability das Lernen erleichtern können, kann schlechte Usability das Lernen sogar verhindern oder erschweren (Bourges-Waldegg et al. 2000). Nach Nielsen (1993) ist die Usability eines Geräts hoch, wenn die Bedienung leicht und effizient, sowie einfach zu merken ist und wenn bei der Bedienung wenige Fehler auftreten. Bei AR-Anwendungen bzw. -Geräten kann eine unzureichende Usability durch Probleme bei der Bedienung des AR-Geräts oder durch die Interaktion in AR entstehen: Es müssen dann viele kognitive Ressourcen der Lernenden für die Benutzung des Geräts oder die Bedienung der Anwendung aufgewandt werden, die für den Lernprozess nicht mehr zur Verfügung stehen (Bourges-Waldegg et al. 2000). Bereits in den Anfangszeiten von AR im Bildungsbereich wurde von Nutzungs- und Implementationsschwierigkeiten berichtet (vgl. z. B. Munoz-Cristobal et al. 2015; Radu 2014). Auch aktuellere Reviews zeigen, dass unzureichende Usability von AR-Anwendungen eines der größten Hindernisse beim praktischen Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen darstellt (Akçayır & Akçayır 2017; Alzahrani 2020; Ibanez et al. 2017, Radu 2014).

Insgesamt scheint es (vermutlich wegen der häufigeren Verwendung von Tablet-AR) im Bildungsbereich viel mehr Usability-Forschung zu Tablet-AR zu geben als zu Brillen-AR bzw. zu AR-Brillen bei Fokussierung auf das verwendete Gerät (Dey et al. 2018: 5, 7). Zur Usability von AR-Brillen für Kindern im Grundschulalter gibt es wenige Studien. Munsinger et al. (2019) evaluierten beispielsweise die Usability von Microsoft's HoloLens. Neuere technische Entwicklungen wie etwa Microsoft's HoloLens 2 (vgl. Kapitel 1.3.1) könnten allerdings die empfundene Usability von AR-Brillen grundlegend verbessern und erfordern daher eine Verstärkung der Usability-Forschung mit diesen Geräten. Auch das multimodale Interface (verschiedene verfügbare Interaktionsmodi in AR) bei HoloLens 2 könnte die Usability im Vergleich zu bisherigen Modellen verbessern, da die Nutzerinnen und Nutzer jeweils die für

sie praktikabelste und am meisten präferierte Art der Interaktion in AR selbst wählen und ggf. flexibel wechseln können (Oviatt & Cohen 2015).

Fachbezüge und -inhalte

Forschung und Entwicklung zu AR fokussiert oft Themen und Fachinhalte aus den MINT-Fächern (Arici et al. 2019; Cheung et al. 2019). Neben Biologie und Chemie werden auch Fachinhalte der Physik adressiert (Arici et al. 2019). Da (insbesondere zum Zeitpunkt des Beginns der Arbeit) noch keine AR-Entwicklungen für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht vorlagen, wurden aus einer Analyse der Entwicklungen zu AR mit Fachbezug Physik geeignete Themen und Inhalte für den Sachunterricht erarbeitet, welche einen curricularen Anschluss im naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufen ermöglichen. Dabei wurde exemplarisch das Fach Physik als Ausgangspunkt für diese Analyse gewählt.

Wie in Abb. 7 dargestellt, lässt sich die Mehrheit der Entwicklungen zu AR mit Fachbezug Physik vier Themenbereichen zuordnen, von denen „Elektrik“ bezogen auf die Zahl der Publikationen der größte und am stärksten beforschte Bereich zu sein scheint. Um bzgl. empirischer Befunde bestmöglich an bestehende Forschung zu AR anknüpfen zu können, wurde der Themenbereich „Elektrik“ für die vorliegende Arbeit ausgewählt.

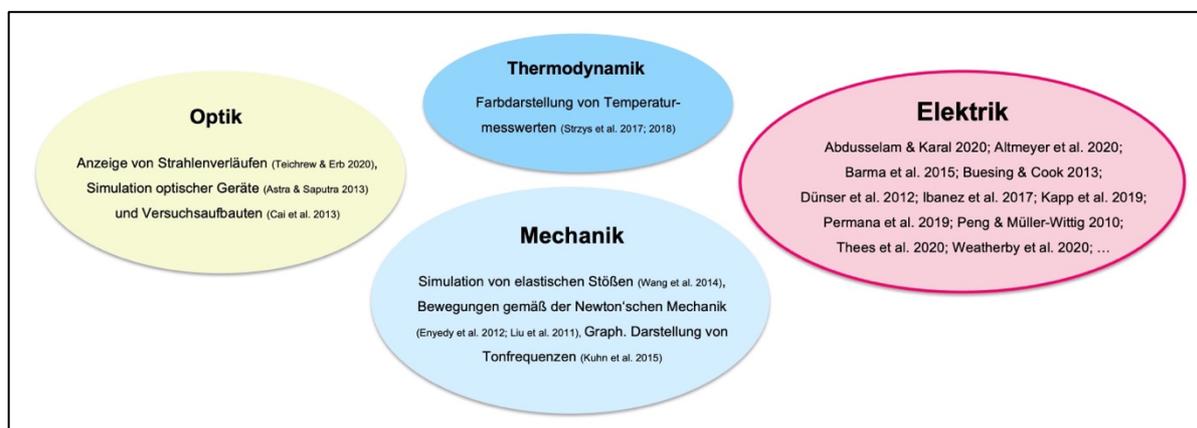


Abbildung 7: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu AR-Anwendungen bzw. Tools mit Fachbezug Physik.

Eine Analyse der AR-Anwendungen und -Tools zum Thema Elektrik ergab, dass sich grob vier Funktionen der AR herauskristallisieren (vgl. Abb. 7). In Anbetracht bestehender Diskurse um das Für und Wider bzw. um die Notwendigkeit der Visualisierung von (abstrakten) Modellen insbesondere in der Primarstufe, (vgl. z. B. Haider & Fölling-Albers 2020 für Elektrik) oder um das Für und Wider des (teilweisen) Ersatzes von Experimenten durch AR-Simulationen auch über die Primarstufe hinaus (vgl. z. B. Dunleavy et al. 2009) knüpft die vorliegende Dissertation an die Forschung bzw. Entwicklung zu AR zur Visualisierung multipler

Repräsentationen beim Thema Elektrizität an. Der gewählte exemplarische Fachinhalt wird in Kapitel 1.4 dargestellt.

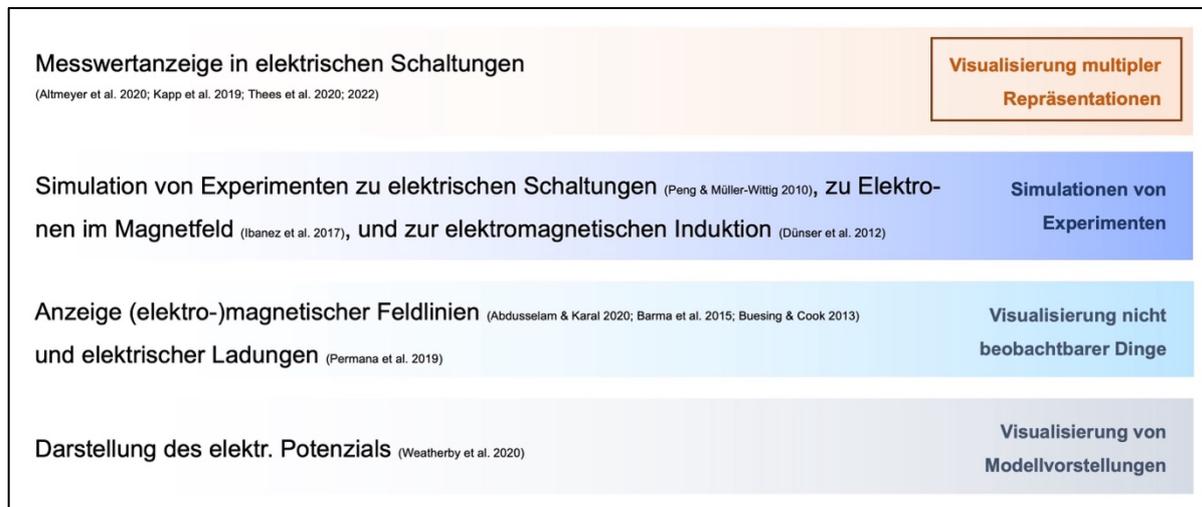


Abbildung 8: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu AR-Anwendungen bzw. Tools zum Thema Elektrizität.

1.4 Augmentierungen zum Erlernen von Schaltsymboliken

Wie in Abb. 8 dargestellt, adressiert bestehende Forschung bzw. Entwicklung zur Visualisierung multipler Repräsentationen in AR beim Thema Elektrizität die Echtzeit-Anzeige von Messwerten (z. B. Stromstärke und Spannung) in elektrischen Schaltungen (Altmeyer et al. 2020; Kapp et al. 2019, Thees et al. 2022). Eine solche AR-Unterstützung kann sicher die gesamtsystemische Betrachtung elektrischer Schaltungen fördern und insbesondere einer punktuellen oder sequenziellen Betrachtung von (Veränderungen von) Gegebenheiten in elektrischen Schaltungen (vgl. Closset, 1993; Heller & Finley 1992; von Rhöneck & Völker 1984; von Rhöneck 1986; Wilhelm & Hopf 2018) entgegenwirken. Allerdings sind Größen in elektrischen Schaltungen (Spannung, Stromstärke, Widerstand) oder auch Gesetzmäßigkeiten in elektrischen Schaltungen keine Themen des Sachunterrichts der Primarstufe.

Ein Thema des Sachunterrichts der Primarstufe, welches multiple Repräsentationen beinhaltet und auch nicht konfliktiert mit dem Diskurs um das Für und Wider bzw. um die Notwendigkeit der Visualisierung von Modellen in der Primarstufe, (vgl. z. B. Haider & Fölling-Albers 2020 für Elektrizität), findet sich beispielsweise im Kernlehrplan Sachunterricht für die Klassenstufen 3 und 4 im Saarland. Im Themenkomplex „Unbelebte Natur und Technik“ wird die verbindliche Kompetenzerwartung beschrieben, elektrische Schaltungen zu bauen und darzustellen mithilfe von Schaltskizzen (vgl. Kernlehrplan Sachunterricht Saarland, MBK 2010: 30). Daher soll das Thema Schaltsymbole und Schaltskizzen im Rahmen dieser Dissertation fokussiert werden. Im Folgenden wird der Begriff *Schalt-symboliken* als Oberbegriff verwendet für

Symbole zu einzelnen Bauteilen in elektrischen Schaltungen (z. B. Lampe, Batterie, Kabel, Schalter) und für Schaltskizzen zu (Teilen von) Schaltungen.

Aufgrund von Befunden zu Lernschwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe beim Erlernen von Schaltsymboliken (Duit 2017: 5; McDermott & Shaffer 1992: 999; Stork & Wiesner 1981; Wilhelm & Hopf 2018: 130) sowie aus Befunden zu Lernschwierigkeiten und Vorstellungen beim Thema Elektrizität im Sachunterricht (Wodzinski 2011) wird vermutet, dass sich für das Erlernen von Schaltsymboliken für Kinder im Grundschulalter folgende Lernschwierigkeiten ableiten lassen:

- Verknüpfung der Bauteile mit den zugehörigen Symbolen
- Unterscheidung der Schaltungsart (Reihenschaltung, Parallelschaltung) bei Schaltung und Schaltskizze
- Abstraktion vom Kabelverlauf zur vereinfachten Schaltskizze

Aus fachdidaktischer und psychologischer Sicht besteht das Potenzial von Augmentierungen zum Erlernen von Schaltsymboliken in der gleichzeitigen Visualisierung bzw. Wahrnehmung von realen Bauteilen oder (Teilen von) Schaltungen und den dazu passenden Schaltsymboliken in Echtzeit. Dabei kann im Verständnis der Bruner'schen Trias (Bruner et al. 1971) die enaktive Repräsentation mit einer ikonischen – bzw. beim Verständnis der Schaltsymboliken auch einer symbolischen – Repräsentation in Echtzeit verschränkt dargestellt und wahrgenommen werden.

Es ist hervorzuheben, dass Augmentierungen zum Erlernen von Schaltsymboliken die aus technischer Sicht eröffneten Gestaltungsmöglichkeiten von AR ausschöpfen, da sowohl eine räumliche, eine zeitliche wie auch eine semantische Verschränkung zwischen Realität und Virtualität gegeben ist. Insbesondere die Unterstützung der Abstraktion vom realen Kabelverlauf zur vereinfachten, abstrahierten Anordnung von Kabeln und Symbolen in Schaltskizzen durch Augmentierungen besser unterstützt werden als durch bestehende Alternativen ohne AR, bei denen Bauteile elektrischer Schaltungen mit passenden Symbolen bedruckt oder beklebt sind.

Zwischenfazit 2

Insgesamt besteht ein großes **Forschungsdesiderat bzgl. des Einsatzes von AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht**. Um an die beschriebenen Forschungen bzw. Entwicklungen anschließen zu können, wird im Rahmen dieser Dissertation das Lernen *mit* (AR) fokussiert. Thematisch bestehen gute Anschlussmöglichkeiten für AR im

naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht im Themenbereich Elektrik, speziell zum Thema **Schaltsymboliken**.

Thema der Dissertation

Insgesamt stehen somit **Augmentierungen für das Erlernen von Schaltsymboliken im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe** im Fokus der Dissertation. Die der Dissertation zugehörigen Publikationen (s. nächster Teil) beleuchten dabei jeweils einen theoretischen Teildiskurs dieses übergeordneten Themas oder adressieren eine entsprechende empirische Forschungsfrage.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden folgende Fragen beantwortet (vgl. Einleitung):

1. Wie lässt sich der fach-medien-didaktische Einsatz von AR im Sachunterricht modellieren?
2. Wie lässt sich ein fach-medien-didaktisches AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken konzipieren und technisch realisieren?
3. Welche weiteren fach-medien-didaktischen AR-Tools bzw. -Anwendungen lassen sich für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht skizzieren?
4. Wie „benutzbar“ sind AR-Technologien, mit denen das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken realisiert werden soll, aus technischer Sicht mit Kindern im Grundschulalter?
5. Wie „benutzbar“ ist das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken aus pädagogisch-didaktischer Sicht?

2 Publikationen der Dissertationsschrift

Die der Dissertation zugehörigen Publikationen beleuchten verschiedene theoretische Diskurse und / oder empirische Fragestellungen zum übergeordneten Thema (vgl. Abb. 9). Nachfolgend werden alle zur Dissertationsschrift gehörenden Publikationen entlang des formulierten übergeordneten Themas argumentativ aufeinander aufbauend bzw. zusammenhängend vorgestellt. Es werden jeweils die zentralen Ergebnisse der der theoretischen oder empirischen Überlegungen bzw. Befunde herausgearbeitet. Bei empirischen Arbeiten werden zudem die zugrundeliegenden Forschungsmethoden sowie die verwendeten Forschungsdesigns erläutert.

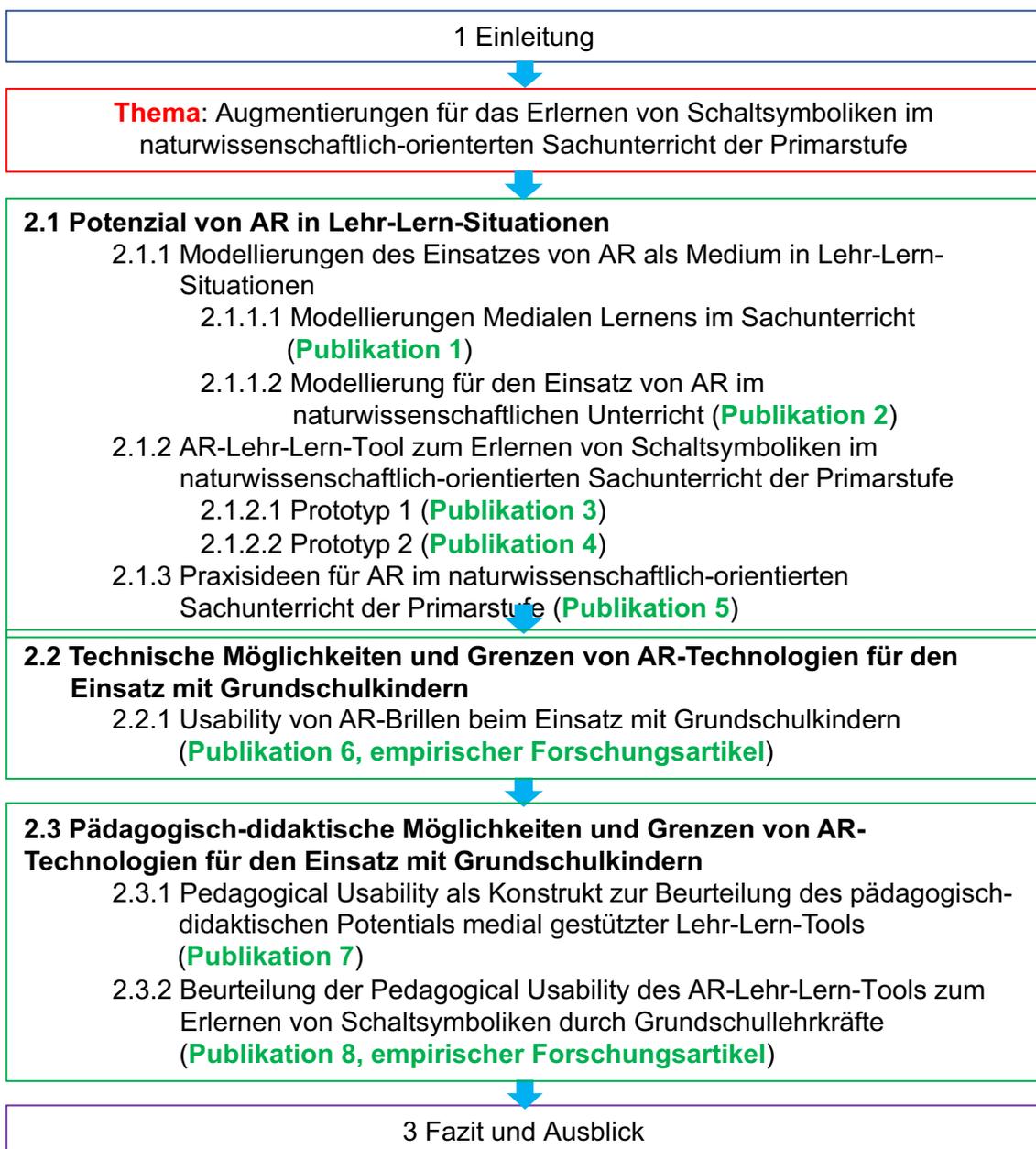


Abbildung 9: Gliederung der Arbeit mit Fokus auf den Publikationen der Dissertation.

2.1 Potenzial von AR in Lehr-Lern-Situationen

2.1.1 Modellierungen des Einsatzes von AR als Medium in Lehr-Lern-Situationen

2.1.1.1 Modellierungen Medialen Lernens im Sachunterricht

Anknüpfend an die in Kapitel 1.1 bzw. Kapitel 1.2 dargelegten Diskurse und Modellierungen im Kontext des Medialen Lernens werden im Rahmen der Publikation 1 aktuelle Problematiken bestehender Modellierungen des Einsatzes von Medien in Lehr-Lern-Situationen, insbesondere solcher für den Sachunterricht aufgezeigt. Dabei wird sowohl das Fehlen von Modellierungen im Verständnis einer fach-medien-didaktischen Rekonstruktion des Medialen Lernens als auch der Überarbeitungsbedarf bestehender Modellierungen angesichts der zunehmenden Verschmelzung von Realität und Virtualität (vgl. individuelle Wahrnehmung in AR, vgl. Dörner et al. 2019, s. a. Kapitel 1.3.2) begründet. Insgesamt wird speziell für AR das Desiderat für eine Modellierung zum fach-medien-didaktisch rekonstruierten Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen (vgl. deAR-Modell im hierauf folgenden Kapitel 2.1.1.2, Publikation 2) formuliert.

Publikation 1: Modellierungen Medialen Lernens

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹, Sarah Bach¹, Johann Seibert²

Art der Publikation: Theoretischer Beitrag in einem Sammelband

Reviewprozess: Einreichung – Überarbeitung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 31.01.2020

Angenommen: 30.04.2020

Publiziert: 14.10.2020

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel, Sarah Bach, Johann Seibert, Waxmann Verlag (Bestätigung durch B. Plugge)

Erschienen in: K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 382–387). DOI: [10.31244/9783830992462](https://doi.org/10.31244/9783830992462).

Copyright: © 2020, Waxmann Verlag GmbH, Münster

Lizenz: CC-BY-NC-ND 4.0 (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitungen 4.0 international)

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, konzeptionelle Beratung und Unterstützung, Supervision

Sarah Bach: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung für Kapitel 1

Johann Seibert: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung für Kapitel 3

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

²Universität des Saarlandes, Physikalische Chemie und Didaktik der Chemie (zum Zeitpunkt der Verfassung und / oder Veröffentlichung der o. g. Publikation)

Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹, Sarah Bach¹ & Johann Seibert²

Modellierungen Medialen Lernens

Zusammenfassung

Ausgehend von der intensiven Auseinandersetzung bei der Entwicklung von digitalen Lernangeboten im geographisch orientierten Sachunterricht wird in diesem Beitrag gezeigt, inwiefern Definitionen bzw. Bezeichnungen von digitalen Lernangeboten erweitert werden müssen. Aufbauend auf diese Analyse wird definiert, inwieweit mediale Lernangebote sowohl fachdidaktischen als auch mediendidaktischen Ansprüchen und Forderungen (GFD, 2018) genügen.

Schlagworte: Digitale Medien, Mediales Lernen, Augmented Reality, Didaktik des Sachunterrichts

1. Modellierungen Medialen Lernens im Sachunterricht: Problemlage und Konsequenzen

Aktuelle Begriffe, wie ‚Digitales Lernen‘ oder ‚Digitale Kompetenzen‘, müssen aus fachdidaktischer Sicht sehr exakt definiert und die damit verstandenen fachlichen und didaktischen Sichtweisen und Anwendungsfelder expliziert werden, um fach- und mediendidaktische Implikationen sowie die Zielsetzung, ein ‚Mediales Lernen‘ (Peschel, 2016a) zu erzeugen, transparent zu machen. In einem fachdidaktischen Verständnis wird ein ‚Medium‘ über die charakteristischen didaktischen Möglichkeiten des Einsatzes in Lehr-Lernsituationen, die sich aus technischen Spezifika eröffnen, definiert (Peschel, 2016a). Der Sachunterricht der Primarstufe hingegen versteht Medien im Allgemeinen, aber insbesondere digitale Medien, immer im Sinne der „kindlichen Welterschließung“ (GDSU, 2013, S. 9) und damit in einer doppelten Funktion: dem Lernen *mit* Medien und dem Lernen *über* Medien (GDSU, 2013; Peschel, 2016b). Demnach sind Medien sowohl Gegenstand als auch als Werkzeug des Lernens – unter dem Primat des Didaktischen (Gervé, 2016; Peschel, 2016b). Insbesondere bedeutet dies, dass nur eine parallele Adressierung des Lernens *mit* und *über* Medien einem Medialen Lernen im sachunterrichtlichen Verständnis der ‚kindlichen Welterschließung‘ (GDSU, 2013, S. 9) gerecht wird.

Im Modell „Mediales Lernen im Sachunterricht“ (Gervé & Peschel, 2013) werden die mediendidaktischen Begriffe „Medienpädagogik“, „Medienerziehung“, „Medienbildung“, „Mediendidaktik“ und „Medienkompetenz“ definiert und in einer hierarchischen Systematik im Kontext des welterschließenden Lernens *mit* und *über* Medien im Sachunterricht der Primarstufe verortet. Diese zielgerichtete Modellierung ‚Medialen Lernens‘ soll Begrifflichkeiten voneinander abgrenzen aber vor allem den wechselseitigen Zusammenhang herstellen, um darauf aufbauende schulische Konzepte der Vermittlung von Kompetenzen für die durch digitale Medien geprägte Welt (KMK, 2016) entwickeln zu können. Dies zeigt beispielhaft die Problematik derzeitiger Modellierung

1 Didaktik des Sachunterrichts, Universität des Saarlandes

2 Physikalische Chemie und Didaktik der Chemie, Universität des Saarlandes

gen Medialen Lernens auf: Die Grundlegung des Modells erfolgt über die ‚Welterschließung‘ als Kernaufgabe des Sachunterrichts, bezieht sich aber in allen Aspekten auf Aspekte der Mediendidaktik und weniger auf die fachlichen Inhalte des Sachunterrichts. Dementsprechend werden Forderungen der Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) nicht berücksichtigt, die die Ausrichtung des Einsatzes (neuer bzw. digitaler) Medien insbesondere auf Grundlage fachlicher Lernziele und Kompetenzen (GFD, 2018) fordern, um einer einseitigen Ausrichtung von Lehr-Lernumgebungen und Fachdidaktik auf mediendidaktische Überlegungen entgegenzuwirken –insbesondere da mediale Kompetenzen im Kontext neuer bzw. digitaler Medien anders zu bewerten sind als im Kontext analoger Medien (Strobl, 2004). Es scheint daher unabdingbar zu sein, fachliches Lernen digital mit Medien zu unterstützen sowie Mediales Lernen fachlich grundzulegen (AG Medien & Digitalisierung der GDSU, 2019).

Die Ergebnisse einer quantitativen Interventionsstudie zu *kidipedia* – einem Online-Wiki von Kids für Kids (Schirra et al., 2018) – zeigen, wie bestehende Modellierungen gemäß den oben genannten Forderungen erweitert und Begrifflichkeiten entwickelt werden müssen. Dabei müssen fachdidaktische und mediendidaktische Bezüge gleichermaßen aufgegriffen werden, um einerseits Fachlichkeit medial zu lernen und Mediales Lernen fachlich zu betreiben (GFD, 2018). Dieses neue ‚medien-fachdidaktische Verständnis‘ muss unter anderem mittels neuer beziehungsweise spezifischer Begriffe im sachunterrichtlichen Verständnis des Lernens *mit* und *über* Medien verortet werden (Peschel, 2015). Der entwickelte medien-fachdidaktische Begriff der ‚Digitalen kartographischen Medienkompetenz‘ (Bach, 2018) verortet und expliziert Aspekte, die in einem solchen Schnittbereich liegen: ‚Digitale kartographische Medienkompetenz‘ begreift den geographischen Aspekt der Kartenarbeit *und* die mediendidaktische Auseinandersetzung mit (Geo-)Medien und fasst diese in einem neuen Begriff. Mit der gleichzeitigen Berücksichtigung sowohl fachlich-geographischer Kompetenzen als auch medialer Kompetenzen ermöglicht der sachunterrichtliche Einsatz digitaler Karten – im Vergleich zu analogen Karten – eine „erweiterte Medienkompetenz“ (GDSU, 2013, S. 83) im Sinne des bereits angesprochenen parallelen Lernens *mit* und *über* Medien (Peschel, 2015). Insgesamt bedürfen also derzeitige Modellierungen Medialen Lernens, wie beispielsweise das Modell „Mediales Lernen Sachunterricht“ (Gervé & Peschel, 2013), einer Erweiterung beziehungsweise Überarbeitung durch ‚medien-fachdidaktische‘ Explikationen.

2. Entwicklungen zur Modellierung Medialen Lernens am Beispiel von Augmented Reality

Die digitale Technik Augmented Reality vermag es, die Wahrnehmung der realen Umgebung durch digitale Inhalte anzureichern (Azuma et al., 2001). Auch (digitale) Abbilder der Realität (wie z. B. die Ansicht in der Kameraperspektive auf einem Display) werden als ‚real‘ verstanden (Demarmels, 2012) und somit sind (nur) die digitalen Objekte, die außerhalb der Augmented Reality-Umgebung nicht sichtbar sind, als ‚virtuell‘ zu bezeichnen. Es können (audio-)visuelle, virtuelle Informationen sowohl räumlich (in der Nähe des Realobjekts), zeitlich (entsprechend der zeitlichen Dauer realer Abläufe) als auch semantisch (inhaltlich kohärent oder gar interaktiv) mit realen Objek-

ten verknüpft werden (Milgram, 1994), was die Orchestrierung (Weinberger, 2018) z. B. hinsichtlich besserer, nachhaltigerer oder schnellerer Vermittlung von fachlichen Inhalten und ggf. Kompetenzen erhöhen soll. In Abgrenzung zu anderen digitalen Techniken, bei denen lediglich ein „digitaler Informationskanal“ zur Verfügung steht (also „Bildschirm/Display-Medien“ oder VR), besteht die technische Innovation von Augmented Reality in der beschriebenen Verknüpfung und simultaner Wahrnehmung realer und virtueller Informationen. Besonders die Gleichzeitigkeit des Lernens an realen und virtuellen Objekten könnte eine Verschmelzung fach- und medienbezogener Begrifflichkeiten und Verständnisse im Hinblick auf die oben beschriebene Forderung nach Überarbeitung bestehender Modellierungen Medialen Lernens verstärkt erfordern. Aufgrund dieser technischen (und damit didaktischen) Besonderheiten werden im Folgenden Entwicklungen zur Modellierung Medialen Lernens in Bezug auf die anfangs geschilderte Problemlage und die formulierten Konsequenzen am Beispiel von Augmented Reality beleuchtet.

Aus der oben beschriebenen medien- und fachdidaktischen Entwicklung von Begriffen und Konzepten folgen an der Universität des Saarlandes Projekte, die einerseits mediale Lernangebote unter fachlichen – in diesem Verständnis sachunterrichtlichen – Grundlegungen sowie mediendidaktischen Ausrichtungen mittels digitaler Technik in schulische Situationen transportieren und den o.g. ‚Mehrwert‘ bzw. eine ‚Orchestrierung‘ (Weinberger, 2018) verschiedener Lernangebote erzeugen. Ein innovativer Fokus – ausgelöst von technischen Entwicklungen – ist das vom BMBF geförderte Projekt „GeAR- Gelingsbedingungen und Grundsatzfragen des Einsatzes von Augmented Reality in Lehr-Lernsituationen“. Die Einsatzmöglichkeiten von Augmented Reality im Sachunterricht der Primarstufe werden dabei exemplarisch für den Lerninhalt „Symbolverständnis“ im Themenbereich „Elektrik“ im Rahmen des Verbundprojektes „GeAR“ erforscht. In verschiedenen Klassenstufen werden Wirkungen von Augmented Reality im Kontext von naturwissenschaftlichen Lehr-Lernsituationen untersucht: z. B. Motivationseffekte (Kuhn et al., 2015; Chen et al., 2017), kognitionspsychologische Effekte in den Bereichen Split-Attention (Altmeyer et al., 2020) sowie Hindernisse und Problemquellen (Munoz-Christobal et al., 2015).

Um die ‚Orchestrierung‘ (Weinberger, 2018) medialer didaktischer Lehr-Lernangebote auf schulische Abläufe und Ansprüche hin zu optimieren, muss allerdings zusätzlich im Verständnis des Medialen Lernens (s.o.) der Einsatz von Augmented Reality auf die in der jeweiligen Lehr-Lernsituation relevanten Lernziele bzw. Kompetenzen ausgerichtet werden (GFD, 2018). Seibert et al. (2020 i.V.) schlagen das deAR-Modell (*didactically embedded Augmented Reality*) als Planungsmodell zur medien-fachdidaktischen Planung von Augmented Reality im naturwissenschaftlichen Unterricht vor, welches zur Entwicklung und Adaption theoretischer Modellierungen Medialen Lernens im Kontext von Augmented Reality herangezogen werden kann. Es steht exemplarisch für einen (präskriptiven) und praxisnahen Ansatz zur Adaption bezüglich der zuvor formulierten ‚medien-fachdidaktischen‘ Grundlegung von Modellierungen bzw. Begrifflichkeiten Medialen Lernens. Entlang des deAR-Modells und entsprechend der Ausrichtung des Einsatzes von Augmented Reality an fachlichen Lernzielen bzw. Kompetenzen wird derzeit im Projekt GeAR eine Augmented Reality-Lehr-Lernumgebung zu elektrischen Schaltskizzen (Lauer et al., 2020) für eine vierte Grundschulklasse entwickelt und evaluiert. Dabei wird AR eingesetzt, um repräsentationales und konzeptuelles Verständnis über die Genese und Strukturierung einer symbolischen Schaltskizze,

welche mit einer realen Schaltung korrespondiert, zu fördern. Die jeweils zu der aktuell gebauten Schaltung passende Schaltskizze setzt sich in der Augmented Reality in Echtzeit über der Schaltung sukzessiv zusammen und ermöglicht die Erforschung der oben genannten Motivations- und kognitionspsychologischen Effekte.

Mit Blick auf den oben beschriebenen Diskurs über die Notwendigkeit, stets gleichwertig und gleichzeitig fachliches Lernen medial zu stützen und Mediales Lernen fachlich grundzulegen, fällt auf, dass die derzeitigen forschungstechnischen Entwicklungen zu Augmented Reality zwar erforschen, inwieweit die Erreichung fachlicher Lernziele durch Augmented Reality unterstützt werden kann (im Sinne des Lernens *mit* Augmented Reality). Allerdings müsste die fachliche Einbindung Medialen Lernens (im Sinne des Lernens *über* Augmented Reality) gleichwertig und gleichzeitig adressiert werden. In Analogie zu dem entwickelten Begriff ‚Digitale kartographische Medienkompetenz‘ (Bach, 2018) ist hier zu prüfen, inwieweit Begriffe des Lernens *mit* und *über* Augmented Reality überdacht oder neu geschaffen werden müssen – und was dies im Verständnis des Lehr-Lern-Angebots evoziert. Bezogen auf die beschriebene Notwendigkeit der Überarbeitungen von Modellierungen Medialen Lernens muss überdies das deAR-Modell, welches zunächst für den naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt wurde, noch im sachunterrichtlichen Verständnis des Lernens *mit* und *über* Medien verortet werden, um eine produktive Nutzung des deAR-Modells bei Theorieentwicklung und Erkenntnisgewinnung in der Didaktik des Sachunterrichts zu ermöglichen.

3. Fazit und Ausblick

Modellierungen Medialen Lernens sind notwendig für den (aus fachdidaktischer Sicht) sinnvollen Einsatz (digitaler) Medien in Lehr-Lernsituationen, müssen allerdings mit der Etablierung neuer Techniken, digitaler Medien und damit neuen didaktischen Möglichkeiten ggf. adaptiert und/oder erweitert werden, insbesondere bezüglich der ‚medien-fachdidaktischen‘ Grundlegung und Explizierung von Begrifflichkeiten Medialen Lernens. Das deAR-Modell (Seibert et al., 2020) liefert bezüglich einer solchen Adaption einer Modellierung Medialen Lernens, insbesondere für Augmented Reality, einen vielversprechenden Ansatz. Hier könnte das Projekt MoDiSaar der Universität des Saarlandes anknüpfen, welches auf die Anbahnung digitalisierungsbezogener Kompetenzen bei (angehenden) Lehrkräften im Saarland abzielt. Es handelt sich dabei um ein fächerübergreifendes, ausbildungsphasenübergreifendes Projekt mit Lehr- und Fortbildungsveranstaltungen, welches neben einem theoriegeleiteten Basismodul zu allgemeinen Aspekten der Digitalisierung auch fächerspezifische medien-spezifische Anwendungsmodule enthält und besonders aktuelle Forderungen der GFD (2018) berücksichtigt. Im Rahmen von MoDiSaar könnte die beschriebene Notwendigkeit der Verortung des deAR-Modells im sachunterrichtlichen Verständnis des Lernens *mit* und *über* Medien erfolgen, wobei auch eine spätere Übertragung des Modells in weitere Fachbezüge vorstellbar und wünschenswert ist.

Förderhinweis

Die in diesem Artikel genannten Vorhaben GeAR und MoDiSaar werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzei-

chen 01JD1811A (GeAR), beziehungsweise 01JA2035 (MoDiSaar) gefördert. MoDiSaar wird zusätzlich mit Mitteln aus dem Hochschulpakt der saarländischen Staatskanzlei gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Literatur

- AG Medien & Digitalisierung der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2019). *Sachunterricht und Digitalisierung* (Preprint). Abgerufen am 31.01.2020 von: <https://tinyurl.com/sr5r7c4>
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J. & Brünken, R. (2020). The Use of Augmented Reality to Foster Conceptual Knowledge Acquisition in STEM Laboratory Courses – Theoretical Background and Empirical Results. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Bach, S. (2018). *Subjektiver Kompetenzerwerb von Schülerinnen und Schülern beim unterrichtlichen Einsatz von kidi-Maps. Eine Studie zum Einsatz digitaler Karten am Beispiel von kidi-Maps im Vergleich zu analogen Karten bei Schülerinnen und Schülern einer vierten Jahrgangsstufe*. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- Chen, C.-H., Huang, C.-Y. & Chou, Y.-Y. (2017). Integrating augmented reality into blended learning for elementary science course. *Proceedings of the 5th International Conference on Information and Education Technology – ICJET '17*, 68–72. <https://doi.org/10.1145/3029387.3029417>
- Demarmels, S. (2012). Als ob die Sinne erweitert würden... Augmented Reality als Emotionalisierungsstrategie. *IMAGE*, 16, 34–51.
- Gervé, F. (2016). ICT im Sachunterricht – Impulse für Forschung und Entwicklung. In M. Peschel (Hrsg.), *Mediales Lernen – Beispiele für inklusive Mediendidaktik* (S. 35–52). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Gervé, F. & Peschel, M. (2013). Medien im Sachunterricht. In E. Gläser & G. Schönknecht (Hrsg.), *Sachunterricht in der Grundschule* (S. 58–79). Frankfurt am Main: Grundschulverband.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2013). *Perspektivrahmen Sachunterricht*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (2018). *Fachliche Bildung in der digitalen Welt – Positionspapier der Gesellschaft für Fachdidaktik*.
- Kuhn, J., Lukowicz, P., Hirth, M. & Weppner, J. (2015). gPhysics – Using Google Glass as Experimental Tool for Wearable-Technology Enhanced Learning in Physics. *Intelligent Environments*.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2016). *Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz*. Abgerufen am 01.07.2020 von: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2018/Strategie_Bildung_in_der_digitalen_Welt_idF_vom_07.12.2017.pdf
- Lauer, L., Peschel, M., Marquardt, M., Seibert, J., Lang, V. & Kay, C. (2020). Augmented Reality (AR) in der Primarstufe – Entwicklung einer AR-gestützten Lehr-Lerneinheit zum Thema Elektrizität. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019* (S. 944–947). Universität Duisburg-Essen.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. & Kishino, F. (1994). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telematics and Telepresence Technologies* 2351, 282–292. <https://doi.org/10.1117/12.197321>

- Munoz-Christobal, J. A., Jorrin-Abellan, I. M., Asensio-Perez, J. I., Martinez-Mones, A., Prieto, L. P. & Dimitriadis, Y. (2015). Supporting teacher orchestration in ubiquitous learning environments: A study in primary education. *IEEE Transactions on Learning Technologies* 8, (1), 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>
- Peschel, M. (2015). Medien im Sachunterricht – Unterricht gestalten – Lernkulturen entwickeln. *Grundschule aktuell*, 131, 10–14.
- Peschel, M. (2016a). Mediales Lernen – Eine Modellierung als Einleitung. In M. Peschel (Hrsg.), *Mediales Lernen – Beispiele für inklusive Mediendidaktik* (S. 7–16). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Peschel, M. (2016b). Medienlernen im Sachunterricht – Lernen mit und Lernen über Medien. In M. Peschel & T. Irion (Hrsg.), *Neue Medien in der Grundschule 2.0. Grundlagen – Konzepte – Perspektiven* (S. 33–49). Frankfurt am Main: Grundschulverband.
- Schirra, S., Peschel, M. & Scherer, N. (2018). „kidi on tour“ – Mobile Learning und das Potenzial digitaler Geomedien zur Vermittlung digitaler Raum-Zeitlichkeit am Beispiel von GOFEX und kidipedia. In M. Pietraß, J. Fromme, P. Grell & T. Hug (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 14. Der digitale Raum – Medienpädagogische Untersuchungen und Perspektiven* (S. 157–175). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-19839-8_9
- Seibert, J., Lauer, L., Marquardt, M., Peschel, M. & Kay, C. (2020). deAR – didaktisch eingebettete Augmented Reality. *Tagungsband „Bildung, Schule und Digitalisierung“*, Köln 2020 (Preprint).
- Strobl, J. (2004). OpenGIS und Schulunterricht. Lernziele im Bereich Geo-Medien-Kompetenz. In D. Schäfer (Hrsg.), *Geoinformation und Geotechnologien* (S. 75–85). Mainz: Geographisches Institut.
- Weinberger A. (2018). Orchestrierungsmodelle und -szenarien technologie-unterstützten Lernens. In S. Ladel, J. Knopf & A. Weinberger (Hrsg.), *Digitalisierung und Bildung* (S. 117–139). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18333-2_7

2.1.1.2 Modellierung für den Einsatz von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht

Publikation 1 beschrieb die Notwendigkeit bzw. erklärte die Bedeutung einer Modellierung im Verständnis einer fach-medien-didaktischen Rekonstruktion (vor allem mit Blick auf dem Lernen *mit* Medien, vgl. Peschel 2016). Wie in Kapitel 1.3.3 dargelegt wurde, entstehen insbesondere für AR immer mehr Anwendungen bzw. Tools für den Bildungsbereich, allerdings werden bei vielen dieser Anwendungen bzw. Tools die pädagogisch-didaktischen Gestaltungsmöglichkeiten von AR in Lehr-Lern-Situationen nicht oder nur wenig ausgeschöpft. Daher wurde im Rahmen der Publikation 2 eine entsprechende Modellierung speziell für den fach-medien-didaktisch rekonstruierten Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen entwickelt.

Die Zielgruppe für die Modellierung sind in erster Linie praxisnahe Bildungsakteurinnen und Bildungsakteure wie Lehrkräfte und App-Entwicklerinnen und App-Entwickler für den Bildungsbereich. Während in der Publikation 2 (Seite 454) die fach-medien-didaktische Rekonstruktion für eine AR-Anwendung aus der Didaktik der Chemie beschrieben wird, wurde das Modell im Rahmen der Dissertation genutzt, um das im hierauf folgenden Kapitel 2.1.2 präsentierte AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken zu entwickeln.

Publikation 2: deAR: didaktisch eingebettete Augmented Reality

Autor*innen: Johann Seibert², Luisa Lauer¹, Matthias Marquardt², Markus Peschel¹, Christopher W. M. Kay¹

Art der Publikation: Theoretischer Beitrag in einem Sammelband

Reviewprozess: Einreichung – Überarbeitung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 31.01.2020

Angenommen: 30.04.2020

Publiziert: 14.10.2020

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Johann Seibert, Luisa Lauer, Matthias Marquardt, Markus Peschel, Christopher W.M. Kay, Waxmann Verlag (Bestätigung durch B. Plugge)

Erschienen in: K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 451–456). DOI: [10.31244/9783830992462](https://doi.org/10.31244/9783830992462).

Copyright: © 2020, Waxmann Verlag GmbH, Münster

Lizenz: CC-BY-NC-ND 4.0 (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitungen 4.0 international)

Eigener Arbeitsanteil:

Mit-Verfassung des Manuskripts (Zweitautorschaft)

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Johann Seibert: Verfassung des Manuskripts

Markus Peschel: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung, Mit-Verfassung des Manuskripts

Matthias Marquardt: Konzeption einer ersten Version des Modells

Christopher W. M. Kay: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

²Universität des Saarlandes, Physikalische Chemie und Didaktik der Chemie (zum Zeitpunkt der Verfassung und Veröffentlichung der o. g. Publikation)

Johann Seibert¹, Luisa Lauer², Matthias Marquardt¹, Markus Peschel² & Christopher W. M. Kay^{1,3}

deAR: didaktisch eingebettete Augmented Reality

Zusammenfassung

Augmented Reality (AR) bietet durch Verknüpfung von Realität und digitaler Augmentation insbesondere für die Naturwissenschaftsdidaktik die Möglichkeit der Augmentation nichtbeobachtbarer Zustände sowie Prozesse zum tiefergehenden Verständnis. Das deAR-Modell stellt ein Planungsmodell für die Realisierung bzw. Evaluation von AR-Lehr-Lernumgebungen dar. In diesem Beitrag werden das Modell sowie die Anwendung des Modells am Beispiel einer AR zum Periodensystem der Elemente vorgestellt. **Schlagnworte:** ICT, Augmented Reality, Naturwissenschaftsdidaktik, Lehrer*innenbildung

1. Augmented Reality: Neue Möglichkeiten zur Vermittlung fachbezogener und digitalisierungsbezogener Kompetenzen

Nicht nur Fachdidaktiken, politische Gremien und wissenschaftliche Fachgesellschaften fordern die Anbahnung verbindlicher digitalisierungsbezogener Kompetenzen für Schüler*innen (Kultusministerkonferenz (KMK), 2016; Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD), 2018; Grundschulverband (GV), 2018; Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), 2019) und für Lehrkräfte (KMK, 2019). Hochschulen sind daher im Bereich der Lehrer*innenausbildung mit einer doppelten Aufgabe betraut: Einerseits müssen zukünftige Lehrer*innen über digitalisierungsbezogene Kompetenzen im Bereich des Lernens *mit* und *über* Medien (z. B. Peschel & Irion, 2016) verfügen: Sie sollen medial gestützte Unterrichtseinheiten konzipieren, den unter fachlichen und pädagogischen Gesichtspunkten geplanten Einsatz digitaler Medien kritisch reflektieren und gleichzeitig müssen sie ein konstruktiv-kritisches Bewusstsein für Digitalität (Stalder, 2016) entwickeln und vermitteln. Insbesondere die kritische Einschätzung der Möglichkeiten und Wirkungen der Digitalisierung ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass Lehrkräfte Schüler*innen im (naturwissenschaftlichen) Unterricht in der Ausbildung digitalisierungsbezogener Kompetenzen unterstützen können. Vorhandene Konzeptionen zur Einbindung digitaler Medien in naturwissenschaftliche Lehr-Lernsituationen fokussieren zumeist technische Möglichkeiten des Mediums als eine didaktisch sinnvolle Einbettung der Technik, im Sinne des Lernens *mit* Medien. Andererseits sind Planungskonzepte als „Handreichung“ notwendig, um Lehrkräfte, die zumeist in der Konzeption, Umsetzung und Evaluation von digitalen Unterrichtskonzeptionen wenig professionalisiert sind (Virata & Castro, 2019), zu unterstützen.

In einem Modell zur Verortung digitaler Medien in Lehr-Lernsituationen stellt die Gesellschaft für Informatik (Gesellschaft für Informatik (GI), 2016) im sogenannt-

1 Physikalische Chemie und Didaktik der Chemie, Universität des Saarlandes, Deutschland

2 Didaktik des Sachunterrichts, Universität des Saarlandes, Deutschland

3 London Centre for Nanotechnology, University College London, England

ten Dagstuhl-Dreieck (GI, 2016) technologische, gesellschaftlich-kulturelle und anwendungsbezogene Aspekte in eine wechselseitige Beziehung, um die von der KMK (2016) geforderte „Bildung in der digitalen Welt“ zu ermöglichen. Bezogen auf den Fachunterricht muss diese medienbezogene Darstellung entsprechend ergänzt bzw. erweitert werden, da der unterrichtliche Einsatz digitaler Medien an fachlichen Lerninhalten ausgerichtet ist (Bach, 2018; GFD, 2018; AG Medien & Digitalisierung der GDSU, 2019). Es zeigt sich darüber hinaus, dass Modellierungen Medialen Lernens (Gervé & Peschel, 2013) oder das DPaCK-Modell (Huwer et al., 2019) aufgrund der Weiterentwicklung digitaler Techniken – wie Augmented Reality – sinnvolle Erweiterungen der fachdidaktisch-medialen Aushandlung ermöglichen.

Die digitale Technik Augmented Reality (AR) kann virtuelle Objekte mit der Realität verknüpfen (Azuma et al., 2001), bzw. die Realität durch virtuelle Objekte ergänzen (= „augmentieren“). Die Verknüpfung von Augmentation (A) und Realität (R) kann auf räumlicher, zeitlicher und semantischer Ebene erfolgen und induziert so, je nach Design der AR Lernumgebung, eine hohe oder niedrige Interaktivität bzw. Konnektivität zwischen Realität und Virtualität. Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Kanäle des Wahrnehmens (Informationen aus der realen Umgebung und Informationen aus einer digital generierten Umgebung) nimmt Augmented Reality eine Sonderstellung unter ähnlichen digitalen Visualisierungstechniken (z. B. Virtual Reality) ein. Es bedarf daher der Entwicklung bzw. Anpassung theoriegeleiteter, handlungsorientierter Modelle zum didaktisch sinnvollen Einsatz von Augmented Reality in Lehr-Lernsituationen (Lauer et al., 2020; Seibert et al., 2020). Grundlage für eine Analyse hinsichtlich Interaktivität/Konnektivität und für die Entwicklung bzw. Evaluation von AR-Lehr-Lernsituationen bilden die Fragen:

- Inwieweit interagiert die Augmentierung mit der Realität? (Wieviel „A“ steckt in „R“?)
- Inwieweit orientiert sich die Augmentierung an der Realität? (Wieviel „R“ steckt in „A“?)

2. Das deAR-Modell zur Konstruktion und Evaluation von AR-Lehr-Lernumgebungen im naturwissenschaftlichen Unterricht

Ergänzend zu den oben genannten Modellen, der „Bildung für die digital vernetzte Welt“ (GI, 2018) oder des Medialen Lernens im (Sach-)Unterricht (AG Medien & Digitalisierung der GDSU, 2019), wurde ein Planungsmodell für den naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt mit dem Ziel, die didaktisch-methodische Einbindung von AR in naturwissenschaftliche Lehr-Lernsituationen zu ermöglichen – das deAR-Modell (didactically embedded Augmented Reality). Der didaktische Wert einer AR-Lernumgebung misst sich entsprechend am fachbezogenen Design und an der (fach)didaktischen Einbettung (Wu et al., 2013).

Es existiert bereits eine Vielzahl von AR-Anwendungen – meist für den Alltag oder Spielsituationen – für das Medium Tablet oder Smartphone. Beispiele für unterrichtsbezogene AR-Anwendungen sind u. a. die Augmentierung einer Echtzeitdarstellung von Messdaten (Strzys et al., 2019) oder die räumliche Wahrnehmung von Molekülen (Seibert et al., 2019, Strzys et al., 2019, Maier & Klinker, 2013). Allerdings sind viele dieser

Anwendungen nicht anhand eines entsprechenden fach- *und* mediendidaktischen Modells konzipiert. Bei vielen Augmentierungen werden die didaktischen Möglichkeiten von AR (fachsemantische Verknüpfung bzw. Interaktivität mit dem korrespondierenden Realobjekt) nicht ausgeschöpft. Stattdessen wird z. B. lediglich (auf einem Tablet) eine virtuelle Darstellung eines dreidimensionalen Objekts im Realraum (ohne Verbindung realer und virtueller Objekte) erzeugt.

Somit richtet sich das deAR-Modell an (angehende) Lehrkräfte und soll die Entwicklung AR-bezogener Unterrichtsmittel und den Einsatz von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht modellhaft und reflexiv unterstützen sowie gleichzeitig die digitalisierungsbezogenen Kompetenzen der Lehrkräfte ausweiten (EU, 2017; KMK, 2016; KMK, 2019). Das Modell ist in vier Ebenen unterteilt, welche einen prozeduralen Durchlauf der AR-Planung vorsehen (Abbildung 1). Dabei sind die Reflexion und Evaluation getroffener Entscheidungen zu jeder Zeit auf allen Ebenen und ggf. Wiederholungen der jeweiligen Überlegungen erforderlich. Ausgehend von pädagogischen Zielen und Leitlinien (Ebene 1) wird durch die Aushandlung fachdidaktischer, mediendidaktischer und naturwissenschaftlicher Aspekte (Ebene 2) der naturwissenschaftliche

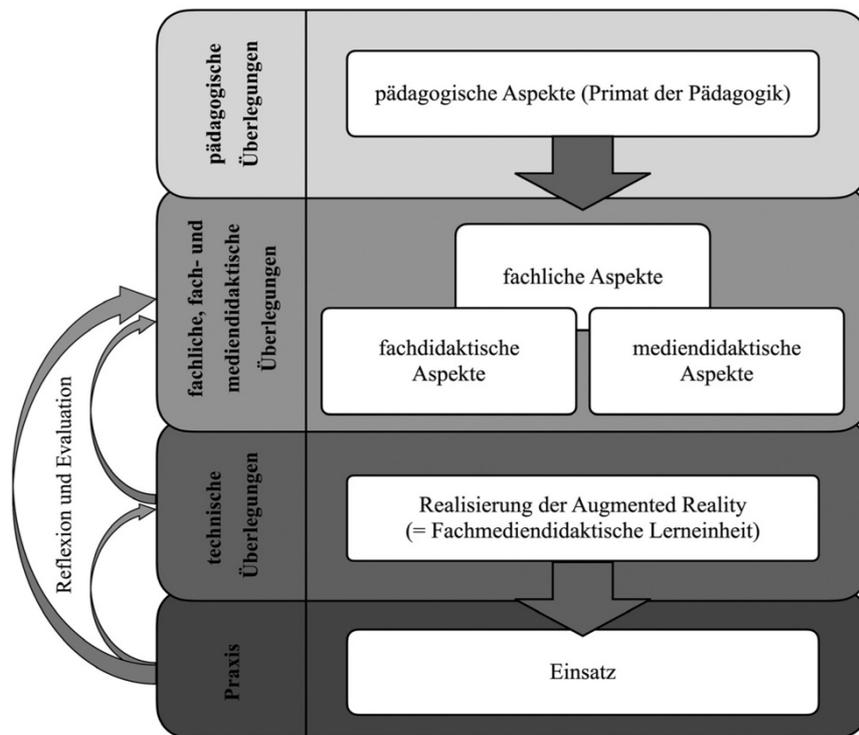


Abbildung 1: Das deAR-Modell zur medien-fach-didaktischen Konstruktion von Augmented-Reality-Lehr-Lerneinheiten im naturwissenschaftlichen Unterricht.

Fachunterricht definiert und unter Berücksichtigung technischer Möglichkeiten und Grenzen eine AR-erweiterte naturwissenschaftliche Lehr-Lerneinheit realisiert (Ebene 3). Letztlich soll die geplante AR-Lehr-Lerneinheit in Realsituationen, also konkreten Lehr-Lernsituation eingesetzt (Ebene 4) und aufgrund entsprechender Reflexion und Evaluation optimiert werden.

3. Anwendung des deAR-Modells am Beispiel der Entwicklung des Periodensystems der Elemente (PSE)

Im Folgenden wird ein Beispiel für eine AR-Entwicklung gemäß des deAR-Modells vorgestellt. Ausgehend von den pädagogischen Zielen des Einsatzes von AR (Individualisierung des Lernens, Kooperative Auseinandersetzung mit Fachinhalt und medialer Darbietung) wird die Lehr-Lernumgebung fachdidaktisch und mediendidaktisch rekonstruiert. Ausgehend vom fachlichen Gesamtlernziel der Lehr-Lerneinheit (die Systematisierung der Elemente gemäß der Strukturen des PSE) werden fach- und mediendidaktische Aspekte in Bezug auf die Erreichung dieses Lernziels ausgehandelt. Ziel ist die weitgehende selbstständige und medial gestützte Systematisierung des PSE durch die Lernenden. Dazu erhalten die Schüler*innen für jedes Element ein Informationskärtchen mit für das Element spezifischen Informationen. Anhand von Vergleichen und Analysieren der Informationen auf dem Kärtchen, wie z. B. Kernladungszahl und Elektronenkonfiguration, können die Schüler*innen u. a. die Elemente in der richtigen Reihenfolge anordnen.



Abbildung 2: Einsatz der AR-Lehr-Lernumgebung in einer neunten Klasse mit Tablets (oben: Schüler*in mit Elementkärtchen; unten: Bohr'sches Atommodell und Kugelwolkenmodell mittels AR über dem realen Elementkärtchen).

Zuletzt muss die AR-Lehr-Lernsituation anhand technischer Grenzen und Möglichkeiten entwickelt werden: Wegen der Größe des Displays und der einfachen Zugänglichkeit wurden hier Tablets als AR-Medium ausgewählt. Die AR-Software wird durch ein Entwicklertool (ZapWorks Studio) selbst erstellt. Die Augmented Reality unterstützt die Schüler*innen hierbei bei Bedarf durch weitere visuelle Informationen (z.B. eine AR-modellierte Elektronenkonfiguration) in ihrem individuellen Lernprozess. Diese dreidimensionalen Modelle der Elektronenkonfiguration werden mittels AR ‚über‘ dem zugehörigen Elementkärtchen als 3D-Objekte augmentiert. Da die Elementkarten optisch gut voneinander unterscheidbar gestaltet werden können, sind die Karten selbst ‚optische Trigger‘ (= ‚Auslöser‘ für die AR) und können direkt für die Aktivierung der jeweils zugehörigen Virtualisierung verwendet werden. AR dient somit als optisches Hilfsmittel. Letztlich wurde die Lerneinheit zum PSE in einer neunten Klasse eines Gymnasiums eingesetzt, reflektiert und zirkulär optimiert.

4. Fazit

Ziel bei der Entwicklung des deAR-Modells war es, ein Planungsmodell als Handlungsgrundlage für Lehrer*innen zu entwickeln, das einem ungeplanten oder unmodellierten Praxiseinsatz von AR-Anwendungen im naturwissenschaftlichen Unterricht entgegenwirkt. Insbesondere bei der Nutzung der Technik AR müssen fach- und mediendidaktische Aspekte kombiniert betrachtet (GFD, 2018) und können mittels des hier vorgestellten deAR-Modells wirksam für den naturwissenschaftlichen Unterricht adaptiert werden.

Ein Beispiel für solch eine geplante didaktisch eingebettete Augmented Reality (deAR) -Lerneinheit stellt das Ordnen des Periodensystems der Elemente dar, da hier auf Grundlage pädagogischer Überlegungen ein AR-gestütztes Unterrichtsszenario entwickelt wurde, das chemische Lerninhalte verfolgt, fach- und mediendidaktische Prinzipien beachtet und technik- bzw. digitalisierungsbezogene Aspekte berücksichtigt.

Literatur

- AG Medien & Digitalisierung der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2019). *Sachunterricht und Digitalisierung* (Preprint). Abgerufen am 31.01.2020 von: <https://tinyurl.com/sr5r7c4>
- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Bach, S. (2018). *Subjektiver Kompetenzerwerb von Schülerinnen und Schülern beim unterrichtlichen Einsatz von kidi-Maps. Eine Studie zum Einsatz digitaler Karten am Beispiel von kidi-Maps im Vergleich zu analogen Karten bei Schülerinnen und Schülern einer vierten Jahrgangsstufe*. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (2018). *Fachliche Bildung in der digitalen Welt – Positionspapier der Gesellschaft für Fachdidaktik*.
- Gesellschaft für Informatik (GI) (2016). *Dagstuhl-Erklärung. Bildung in der digitalen vernetzten Welt*. Abgerufen am 25.01.2020 von https://gi.de/fileadmin/GI/Hauptseite/Themen/Dagstuhl-Erklärung_2016-03-23.pdf

- Grundschulverband (GSV) (2018). *Digitale Mündigkeit beginnt in der Grundschule! Stellungnahme des Grundschulverbands zum „DigitalPakt Schule“ zum KMK-Beschluss „Bildung in der digitalen Welt“*. Abgerufen am 25.01.2020 von: <https://tinyurl.com/yajoklke>
- Huwer, J., Irion, T., Kuntze, S., Schaal, S. & Thyssen, C. (2019). Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht*, 358–364.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2016). *Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz*. Abgerufen am 01.07.2020 von: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2018/Strategie_Bildung_in_der_digitalen_Welt_idF_vom_07.12.2017.pdf
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2019). *Empfehlungen zur Digitalisierung in der Hochschullehre*. Abgerufen am 01.07.2020 von: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2019/2019_03_14-Digitalisierung-Hochschullehre.pdf
- Lauer, L., Peschel, M., Marquardt, M., Seibert, J., Lang, V. & Kay, C. (2020). Augmented Reality (AR) in der Primarstufe – Entwicklung einer AR-gestützten Lehr-Lerneinheit zum Thema Elektrik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019*. 944–947. Universität Duisburg-Essen.
- Maier, P. & Klinker, G. (2013). Evaluation of an augmented-reality-based 3D user interface to enhance the 3D-understanding of molecular chemistry: *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Supported Education*, 294–302.
- Peschel, M. & Irion, T. (2016). Neue Medien in der Grundschule 2.0. Grundlagen – Konzepte – Perspektiven. *Reihe: Beiträge zur Reform der Grundschule (Band 141)*. Frankfurt am Main: Grundschulverband.
- Seibert, J., Marquardt, M., Pinkle, S., Carbon, A., Lang, V., Heuser, K., Perels, F., Huwer, J. & Kay, C. (2020). Linking learning tools, learning companion and experimental tools in a multi-touch learning book. *World Journal of Chemical Education*, 8(1). 8–20. <https://doi.org/10.12691/wjce-8-1-2>
- Strzys, M. P., Thees, M., Kapp, S. & Kuhn, J. (2019). Smartglasses in STEM laboratory courses – the augmented thermal flux experiment. 2018 Physics Education Research Conference Proceedings. *2018 Physics Education Research Conference*, Washington, DC. <https://doi.org/10.1119/perc.2018.pr.Strzys>
- Virata, R. & Castro, J. (2019). Augmented reality in science classroom: perceived effects in education, visualization and information processing. *IC4E 2019: 2019 10th International Conference on E-Education*, 85–92. <https://doi.org/10.1145/3306500.3306556>
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y. & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>

2.1.2 AR-Lehr-Lern-Tool zum Erlernen von Schaltsymboliken im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe

Dieses Kapitel umfasst zwei aufeinander aufbauende Publikationen zu verschiedenen Entwicklungsstufen eines AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken. Dieses AR-Lehr-Lern-Tool wurde entlang des deAR-Modells (s. Publikation 2) konzipiert, wobei die konkrete fach-medien-didaktische Rekonstruktion im Sinne einer Aushandlung zwischen fachlichen, fachdidaktischen und medialen Anforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten in einer gesonderten Publikation (Lauer & Peschel 2020, vgl. Abb. 10) expliziert wurde. Eine erste Skizzierung des AR-Lehr-Lern-Tools als erste Idee findet sich in einer weiteren Publikation, die nicht zu dieser Dissertationsschrift zählt (Lauer et al. 2020). Die durch das AR-Lehr-Lern-Tool adressierten Lernschwierigkeiten im Zusammenhang mit Schaltsymboliken wurden in Kapitel 1.4 erläutert.

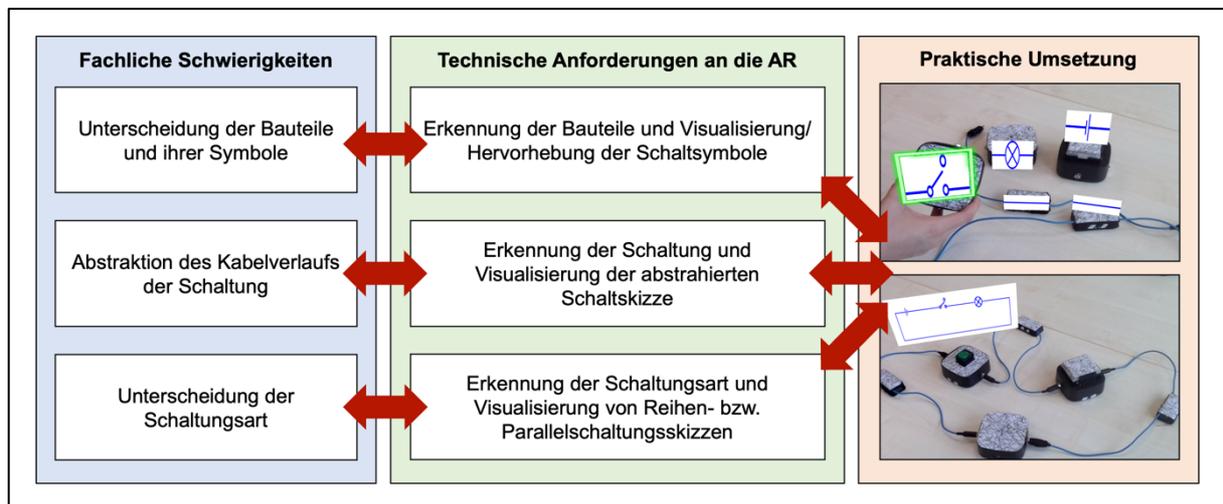


Abbildung 10: Fach-medien-didaktische Rekonstruktion des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken (vgl. Lauer & Peschel 2020: 66; überarbeitetes Layout, geringfügige Modifikationen).

2.1.2.1 Prototyp 1

In der Publikation 3 wird der erste gebrauchsfähige Prototyp des soeben skizzierten AR-Lehr-Lern-Tools präsentiert. Er verfügt über alle technischen und didaktischen Charakteristika aus Abb. 10 bis auf die Erkennung und visuelle Unterscheidung der Schaltungsart (Reihenschaltung vs. Parallelschaltung) sowie die damit verbundene Adaption der Schaltskizze. Die hohe Reaktionszeit bis zur Anpassung der Symboliken in AR bei Veränderungen der realen Schaltung sowie die Fehleranfälligkeit der räumlichen Positionierung der Symboliken in AR eröffneten die Notwendigkeit zur Verbesserung dieses Prototyps (vgl. Publikation 4 im Kapitel 2.1.2.2).

Publikation 3: Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹, Sarah Malone², Kristin Altmeyer², Roland Brünken², Hamraz Javaheri³, Orkhan Amiraslanov³, Agnes Grünerbl³, Paul Lukowicz³

Art der Publikation: Fachdidaktischer Entwicklungsbeitrag in einer Fachzeitschrift

Reviewprozess: Einreichung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 19.06.2020

Angenommen: 27.08.2020

Publiziert: 23.09.2020

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel, Sarah Malone, Kristin Altmeyer, Roland Brünken, Hamraz Javaheri, Orkhan Amiraslanov, Agnes Grünerbl, Paul Lukowicz, AIP Publishing (Bestätigung durch B. Rupp)

Erschienen in: *The Physics Teacher*, 58(7), 518–519. DOI: [10.1119/10.0002078](https://doi.org/10.1119/10.0002078).

Copyright: © 2020, American Association of Physics Teachers

Reproduced from: [Lauer, L., Peschel, M., Malone, S., Altmeyer, K., Brünken, R., Javaheri, H., Amiraslanov, O., Grünerbl, A., & Lukowicz, P. (2020). Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education. *The Physics Teacher*, 58(7), 518–519. <https://doi.org/10.1119/10.0002078>], with the permission of AIP Publishing.

Ursprünglich erschienen unter: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/10.0002078>.

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Mitgestaltung des präsentierten AR-Sets für elektrische Schaltungen

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

Sarah Malone: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

Kristin Altmeyer: Mit-Verfassung des Manuskripts

Roland Brünken: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

Hamraz Javaheri: Technische Entwicklung der dargestellten Hard- bzw. Software,
Mit-Verfassung des Manuskripts

Orkhan Amiraslanov: Technische Entwicklung der dargestellten Hard- bzw. Software

Agnes Grünerbl: Mit-Verfassung des Manuskripts

Paul Lukowicz: Beratung und Unterstützung bei der technischen Entwicklung der
dargestellten Hard- bzw. Software

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

²Universität des Saarlandes, Empirische Bildungsforschung

³Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern (zum Zeitpunkt der
Verfassung und Veröffentlichung der o. g. Publikation)

Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education

Cite as: Phys. Teach. **58**, 518 (2020); <https://doi.org/10.1119/10.0002078>

Published Online: 23 September 2020

Luisa Lauer, Markus Peschel, Sarah Malone, Kristin Altmeyer, Roland Brünken, Hamraz Javaheri, Orkhan Amiraslanov, Agnes Grünerbl, and Paul Lukowicz



View Online



Export Citation



Advance your teaching and career
as a member of **AAPT**

LEARN MORE >

Phys. Teach. **58**, 518 (2020); <https://doi.org/10.1119/10.0002078>

58, 518

© 2020 American Association of Physics Teachers.

Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education

Luisa Lauer and Markus Peschel, Department of Physics, Saarland University, D-66123 Saarbrücken; luisa.lauer@uni-saarland.de, markus.peschel@uni-saarland.de

Sarah Malone, Kristin Altmeyer, and Roland Brünken, Department of Education, Saarland University, D-66123 Saarbrücken; s.malone@mx.uni-saarland.de, kristin.altmeyer@uni-saarland.de, r.brunden@mx.uni-saarland.de

Hamraz Javaheri, Orkhan Amiraslano, Agnes Grünerbl, and Paul Lukowicz, German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI), Embedded Intelligence Group, Trippstadter Straße 122, D-67663 Kaiserslautern, Hamraz.Javaheri@dfki.de, agnes.gruenerbl@dfki.de, Paul.Lukowicz@dfki.de

Empirical research has shown that augmented reality (AR) has the potential to promote learning in different contexts.^{1,2} In particular, this has been shown for AR-supported physics experiments, where virtual elements (e.g., measurement data) were integrated into the learners' visual reality in real time: compared to traditional experimentation, AR reduced cognitive load³ and promoted conceptual learning.^{4,5} Drawing upon previous work from this column,⁶ we present an AR-supported experiment on simple electrical circuits that allows for real-time visualization including highlighting of electrical circuit schematics using either smartglasses or tablet computers. The experiment addresses students in introductory physics education and holds potential to provide visual assistance for complex electrical circuits in secondary or higher physics education.

Theoretical background

Representational competencies—the ability to use different domain-specific representations and to effortlessly switch between them—is considered an important skill in science instruction that is closely related to the acquisition of conceptual knowledge.⁷ However, in introductory physics education, the use of symbolic representations for electrical circuits can evoke difficulties and thus lead to learning impairment, especially when the spatial arrangement of the circuit components does not resemble the clear structure of the corresponding circuit schematic.⁸ The subsequently presented experiment may facilitate the introduction to electrical circuits for students in lower physics or even primary science education and improve their future conceptual learning.



Fig. 1. A student building a circuit with the HoloLens setup using battery (a), cables (b), light bulb (c) and switch (d).

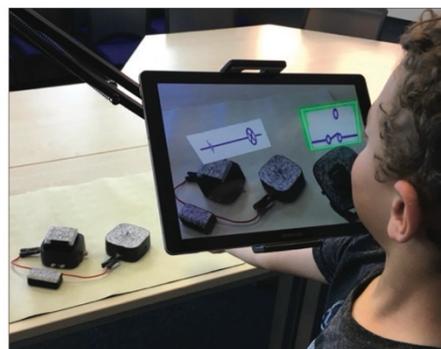


Fig. 2. A student exploring the tools while building an electrical circuit with the tablet setup. Once a tool is touched, the corresponding circuit symbol is highlighted.

Experiment setup

We use the Microsoft HoloLens⁹ as smartglasses (see Fig. 1) and a Samsung Galaxy⁹ tablet computer (see Fig. 2) to supplement the students' field of view with real-time visualizations of electrical circuit schematics corresponding to actual circuits (or parts of circuits) in order to augment the students' perception of real objects with their correct symbolic representation. As the smartglasses are securely mounted on the students' head (see Fig. 1) and the tablet computer is fastened with a bracket (see Fig. 2), the students can build and modify the circuits with their hands free and experience the immediate adaption of the AR-circuit schematic.

An application specifically developed for this purpose displays the circuit schematic symbols above single circuit components as well as full schematics of electrical circuits and allows the circuit schematic to successively assemble in realtime with the construction of the electrical circuit (see Figs. 2 and 3). To strengthen the cognitive association be-

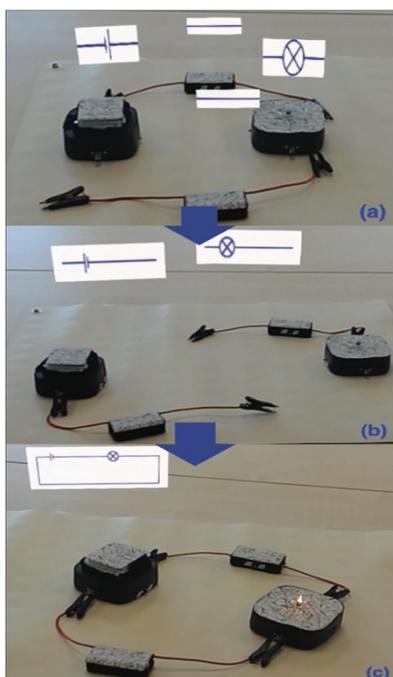


Fig. 3. Snapshots from the HoloLens during a successive circuit assembly: (a) Virtual circuit symbols are displayed above the single circuit components. (b) As components are connected, a virtual circuit schematic assembles. (c) As a full circuit is set up, the virtual circuit schematic adapts accordingly.

tween the component and its symbolic representation, each time a certain component is touched or slightly moved, the corresponding AR-schematic symbol is highlighted (see Fig. 2). To implement the described real-time adaption of the AR-visualization, we integrated a cable identification system into the circuit components as suggested in previous work⁵ and a touch/movement sensor system that both transmit data to the AR-application via wireless network connection.

A combination of RFID tracking and marker-based tracking installed in the circuit components enables the displayed circuit schematics or symbols to follow the position of the components; while the RFID tracking localizes the horizontal position of the components in relation to a reference array mat, the marker-based tracking improves the vertical localization, e.g., when students lift the components from the table.

Experiment procedure

The experiment consists of two phases. In the familiarizing phase, the students are introduced to the circuit components, their purpose in an electrical circuit, and their circuit symbols displayed by AR. Likewise, they are accustomed to the touch-highlighting of the AR-circuit symbols and the merging of symbols into a circuit schematic when components are connected.

During the subsequent work phase, the students are guided to build several simple electrical circuits using cables, light bulbs and a switch while seeing the corresponding real-time AR-circuit schematics.

Outlook on further development

The presented AR-experiment allows for encountering learning difficulties concerning simple electrical circuits in introductory physics courses from primary to secondary education. By adapting the hard- and software for detection and visualization of parallel circuits, the experiment could be used in the curriculum of electrical circuits in physics education from introductory level up to higher courses. Moreover, the AR-highlighting function holds potential to easing the understanding of highly complex electrical circuits, which may be beneficial for conceptual knowledge acquisition especially for secondary or higher physics education.

Acknowledgments

The work described is funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

References

1. J. Garzón and J. Acevedo, "Meta-analysis of the impact of augmented reality on students' learning gains," *Educ. Res. Rev.* **27**, 244-260 (2019).
2. M. Akçayır, and G. Akçayır, "Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature," *Educ. Res. Rev.* **20**, 1-11 (2017).
3. M. Thees, S. Kapp, M. Strzys, F. Beil, P. Lukowicz, and J. Kuhn, "Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses," *Comp. Human Behav.* **108**, 106316 (2020).
4. K. Altmeyer, S. Kapp, M. Thees, S. Malone, J. Kuhn, and R. Brünken, "The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses - Theoretical background and empirical results," *Brit. J. Educ. Tech.* **51** (3), 611-628 (2020).
5. M. P. Strzys, S. Kapp, M. Thees, P. Klein, P. Lukowicz, P. Knierim, A. Schmidt, and J. Kuhn, "Physics holo.lab learning experience: Using Smartglasses for Augmented Reality labwork to foster the concepts of heat conduction," *Eur. J. Phys.* **39** (3), 035703 (2018).
6. S. Kapp et al., "Augmenting Kirchhoff's laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students," *Phys. Teach.* **57**, 52-53 (Jan. 2019).
7. P. Hubber, R. Tytler, and F. Haslam, "Teaching and learning about force with a representational focus: Pedagogy and teacher change," *Res. Sci. Educ.* **40** (1), 5-28 (2010).
8. T. Wilhelm, and M. Hopf, "Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis" (translated as: "Students' conceptions of the electrical circuit"), in *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (translated as: "Students' Conceptions and Physics Education"), edited by H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, and R. Duit (Springer Spektrum, Berlin, 2018), pp. 115-138.
9. This publication is neither affiliated with, nor sponsored or approved by, Microsoft Corp. or Samsung Corp.

2.1.2.2 Prototyp 2

Wie im vorherigen Kapitel 2.1.2.1 angebahnt wurde, verfügt der im Rahmen der Publikation 4 präsentierte zweite Prototyp des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken über einige Verbesserungen im Vergleich zum Vorgänger, z. B. eine Verkürzung der Reaktionszeit bis zur Anpassung der visualisierten Symboliken in AR bei Veränderung der realen Schaltung sowie eine Erhöhung in der Stabilität der Visualisierung in AR.

Weiterhin nicht umgesetzt werden konnte die Erkennung und Unterscheidung verschiedener Schaltungsarten. Im Fazit (Kapitel 3) wird ein Ausblick gegeben auf einen weiteren, dritten Prototyp, welcher Parallelschaltungen erkennen und diese bzgl. der Symboliken korrekt in AR visualisieren kann.

Publikation 4: Augmented Reality-Toolkit for Real-Time Visualization of Electrical Circuit Schematics

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹, Hamraz Javaheri², Paul Lukowicz², Kristin Altmeyer³, Sarah Malone³, Roland Brünken³

Art der Publikation: Fachdidaktischer Entwicklungsbeitrag in einem Konferenzband

Reviewprozess: Einreichung – Annahme (Review durch die Herausgeber*innen)

Eingereicht: 31.01.2022

Angenommen: 19.05.2022

Publiziert: Dezember 2022

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel, Hamraz Javaheri, Paul Lukowicz, Kristin Altmeyer, Sarah Malone, Roland Brünken, Graça S. Carvalho (Herausgeberin)

Erschienen in: Fostering Scientific Citizenship in an uncertain world (Proceedings of ESERA 2021) (S.291–296), <https://www.esera.org/wp-content/uploads/2023/02/CNF21-Complete-eProceedings.pdf> [27.10.2023].

Copyright: Kein Copyright

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Mitgestaltung des präsentierten AR-Sets für elektrische Schaltungen

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

Hamraz Javaheri: Technische Entwicklung der dargestellten Hard- bzw. Software, Unterstützung bei der Verfassung des Manuskripts

Paul Lukowicz: Beratung und Unterstützung bei der technischen Entwicklung der dargestellten Hard- bzw. Software

Kristin Altmeyer: Unterstützung bei der Verfassung des Manuskripts

Sarah Malone: Unterstützung bei der Verfassung des Manuskripts

Roland Brünken: Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

²Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern

³Universität des Saarlandes, Empirische Bildungsforschung

AUGMENTED REALITY-TOOLKIT FOR REAL-TIME VISUALIZATION OF ELECTRICAL CIRCUIT SCHEMATICS

Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹, Hamraz Javaheri², Paul Lukowicz², Kristin Altmeyer³, Sarah Malone³ and Roland Brünken³

¹Saarland University, Department of Physics, Saarbrücken, Germany

²German Research Center for Artificial Intelligence, Kaiserslautern, Germany

³Saarland University, Department of Education, Saarbrücken, Germany

The contribution is centred around the presentation of the didactical concept and the technical implementation of a toolkit for real-time visualizations of electrical circuit schematics with Augmented Reality (AR) for physics education. After an introduction to the state of research on learning with AR in physics education, the didactical curriculum and the specific learning difficulties of electrical circuit schematics from introductory to higher level physics education are expounded. Subsequently, the technical features of the toolkit are explained. The major technical feature of the toolkit is the dynamic real-time visualization of electrical circuit symbols: electrical circuit symbols of components and electrical circuit schematics of (parts of) electrical circuits can be perceived in real-time during the circuit assembly. Lastly, pending technical improvements are discussed and an outlook concerning the practical implementation of the toolkit is given. Overall, this contribution provides insights into current didactical design potentials and prevailing challenges concerning the use of AR-technology in physics education.

Keywords: Dynamic visualization tools, Educational Technology, Physics

THEORETICAL BACKGROUND

Augmented reality in physics education

Augmented Reality (AR) allows for simultaneous perception of real and digitally generated information (Azuma, 2001). It can be understood as a concept for computer-generated environments (Silva et al., 2003), where the real environment as the initial channel of perception is enriched with spatially and/ or semantically connected virtual information (Milgram & Kishino, 1994) to provide supplementary information in real-time (Liu et al., 2006). The most used AR-technology in educational contexts is display-based AR, where a handheld device (e.g., smartphone or tablet) is used to present AR, whereas head-mounted display-AR devices (hereafter referred to as HMD devices) are still little used (Akçayır & Akçayır, 2017). The HMD devices allow for the perception of virtual objects in the direct field of view and leave the hands free for other activities (e.g., the conduction of scientific experiments). AR has emerged as a technology in teaching and learning during the past years and has so far shown potential for applicability in different educational and pedagogical contexts: AR can promote the acquisition of knowledge and skills (Arici et al., 2019; Garzón & Acevedo, 2019), and it can have a positive influence on motivation and engagement (Zhang et al., 2020). However, the use of AR can entail technical difficulties and may result in a prolonged instruction time for both teachers and students (Munoz-Cristobal et al., 2015). Results by Wu et al. (2013) on the implementation of AR in education suggest that overall, not the implementation of AR itself, but the didactical embedment of AR determines the success of learning. The use of didactically substantiated AR technology for physics education, especially AR-supported physics experiments, reduced cognitive load by integrating real and digital information in the learner's

field of view (Thees et al., 2020) and resulted in a higher learning gain compared to a non-AR-setting (Altmeyer et al., 2020). An AR-tool for laboratory experimentation on magnetism by Adusselem & Karal (2020) increased students' academic achievements and facilitated learning. The authors further suggest using AR as a supplemental tool for real-world activities rather than a standalone AR-environment. Permana et al. (2019) published a learning book on electricity that is enriched with animations, sounds and videos by the help of AR. Weatherby et al. (2020) described the concept of an AR-application for real-time visualization of the electrical potential modelled as a height profile alongside the physical circuit. The described real-time integration of spatially and semantically connected information in the field of view by means of AR holds potential to be transferred to other fields of physics education, as shown below.

Difficulties of learning circuit schematics

Although electrical circuit schematics provide a simple, structured symbolic representation of electrical circuits, the understanding and usage of electrical circuit schematics from introductory physics education up to early secondary level physics education can be impaired by various causes: Apart from matching the physical components with the corresponding symbolics, a crucial difficulty lies in the discrepancy between the (rather functional) spatial arrangement of the tools and the clear, often simplified structure of the corresponding circuit schematic (Wilhelm & Hopf, 2018). On the one hand, multiple possible circuit schematics can be drawn based on a single given serial circuit (see Figure 1a). On the other hand, multiple spatial arrangements within a parallel circuit can correspond to the same given circuit schematic (see Figure 1b).

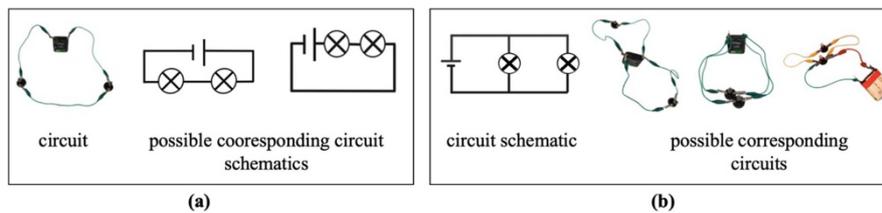


Figure 1. Examples for discrepancies between circuit and corresponding circuit schematics: (a) starting from a given circuit, (b) starting from a given circuit schematic.

The described discrepancies between the spatial arrangement of the tools and the simplified structure of the circuit schematic may obstruct the formation of cognitive connections between the circuit components/ the circuits and their symbolic representations. However, the establishment of representational competencies concerning the shift between physical and symbolic representations of electrical circuits is essential for a beneficial use of circuit schematics. As physics experimentation skills in secondary education can be positively influenced by early-age acquisition of knowledge on physics experimentation (Stern et al., 2015), those competencies should be fostered from an early age on. In higher physics education, however, electrical circuit schematics serve more as a structural aid for the use of complex electrical circuits.

AR-TOOLKIT DEMONSTRATION

Technical Features

To facilitate the learning of electrical circuit schematics and to ease the prevailing learning difficulties, an AR-toolkit to provide real-time visualization of electrical circuit symbols and circuit schematics was designed (Lauer et al., 2020). The components of the toolkit are specially designed boxes with plugs on the sides for establishing cable connections (see Figure 2). Currently available components are lightbulbs, batteries, cables and switches. All components are covered with visual markers as explained later.

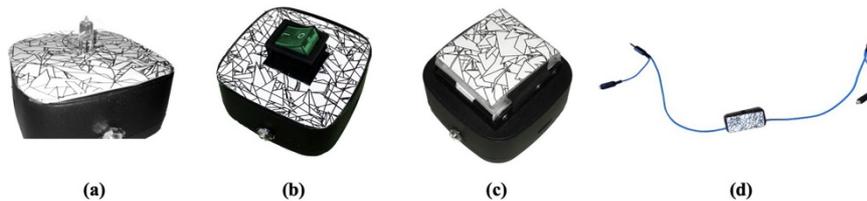


Figure 2. Components of the AR-toolkit: (a) lightbulb, (b) switch, (c) battery, (d) cable.

The toolkit allows for real-time visualization of single component symbols and circuit schematics of unfinished and full electrical circuits (see Figure 3). A visual touch-highlight (see Figure 3a) emphasizes the connection between component and symbol and offers visual orientation when handling many components at a time. The structure of the circuit schematic displays the physical connection of the tools rather than their spatial arrangement in order to always present the semantically correct, but structurally most simplified circuit schematic.

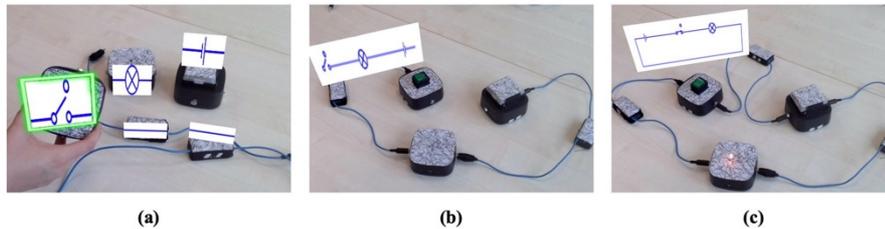


Figure 3. Real-time visualization of symbolics for electrical circuits: (a) visualization of symbols for single components with green touch-highlight, (b) visualization of the schematic for unfinished circuits, (c) visualization of the schematic for full circuits.

The real-time visualization is enabled via wireless communication between the boxes, a server and the mobile AR-device (see Figure 4). The component boxes are distinctively designed so that they can be identified, and their physical connection can be determined at any time during circuit assembly. The information concerning the physical connection of the components is passed on via the wireless network to an application on a computer which calculates the appearance of the corresponding symbols and/ or schematics that are to be displayed. The formerly mentioned visual markers are uniquely assigned to the components and thus serve as the spatial positioning anchor for the corresponding symbols and schematics. In this way, the symbols and schematics can be perceived as virtual objects in spatial proximity to the real

components or circuits and their appearance adapts in real-time when the physical components are moved or when their connection is modified.

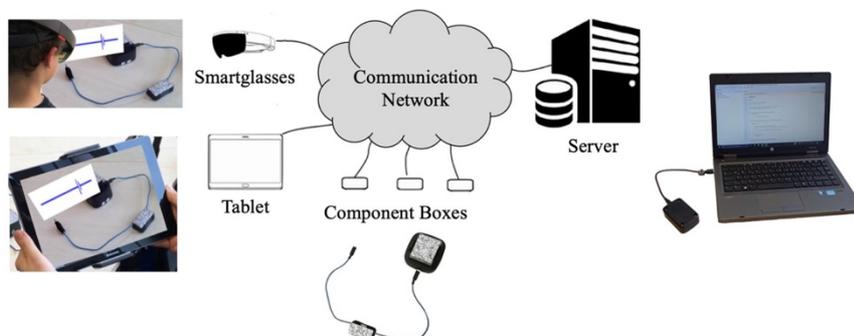


Figure 4. Schematic depiction of the wireless communication network for the real-time visualization of the symbolics via AR.

The toolkit is compatible with both handheld tablet-devices and HMD devices. In the case of handheld tablet-devices, the AR is created by integrating the virtual symbolics and schematics into the camera view of the device. The tablet must be either mounted on a stand (which reduces the mobility) or it must be held in the hand (which impairs the simultaneously ongoing circuit assembly process). As the HMD-devices are mounted on the user's head, they leave the hands free for the physical circuit assembly and create an AR-experience where the symbols and schematics are seemingly integrated into the direct field of view. However, this technology is not yet widely used in education, not least because of the high cost.

Fields of application

The presented AR-toolkit aims at encountering the described difficulties of understanding electrical circuit schematics in introductory physics education. It is suitable for introducing students to the schematic symbols and for step-by-step explanation of the circuit semantics regarding the process of abstraction from the electrical circuit to the simplified circuit schematic in primary school or early secondary school physics education. A major pending development is the detection and visualization of parallel circuits. The aim is to enable the toolkit to distinguish serial from parallel circuits and to adapt the display of the circuit schematics accordingly. The toolkit could then be used in early secondary physics education to support the differentiation between serial and parallel circuits. In higher physics education, the use of the toolkit shifts from a teaching-function to an assistive function. It could be used to keep track of complex connections between components.

Summary and Outlook

Overall, the use of didactically substantiated AR-technology in physics education holds potential to facilitate the acquisition of (representational) competencies by connecting objects of the real world with additional virtual information in real-time. The presented AR-toolkit for real-time visualization of electrical circuit schematics represents a first-stage prototype of such a use case. However, further technical optimization is required to enable its use in everyday

scholar education and training. Therefore, the following technical improvements are planned or are being carried out: the underlying software will be optimized to handle a larger number of active components at a time. This is necessary as regarding the current version, the reaction time of the display of AR-schematics and symbols increases significantly with the number of active components. For the practical use in everyday educational situations, a reduction of the box size and an assimilation to the appearance of common electrical tools in education should be taken into consideration.

ACKNOWLEDGMENTS

The development and the pending evaluation of the presented AR-toolkit are part of the research project GeAR. GeAR is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)), grant numbers 01JD1811A and 01JD1811C.

REFERENCES

- Abdusselam, M. S., & Karal, H. (2020). The effect of using augmented reality and sensing technology to teach magnetism in high school physics. *Technology, Pedagogy and Education*, 29(4), 407–424. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1766550>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J., & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, 51, 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Arici, F., Yildirim, P., Caliklar, Ş., & Yilmaz, R. M. (2019). Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis. *Computers & Education*, 142, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Garzón, J., & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Kapp, S., Thees, M., Strzys, M. P., Beil, F., Kuhn, J., Amiraslanov, O., Javaheri, H., Lukowicz, P., Lauer, F., Rheinländer, C., & Wehn, N. (2019). Augmenting Kirchhoff's laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students. *The Physics Teacher*, 57(1), 52–53. <https://doi.org/10.1119/1.5084931>
- Lauer, L., Peschel, M., Malone, S., Altmeyer, K., Brünken, R., Javaheri, H., Amiraslanov, O., Grünerbl, A., & Lukowicz, P. (2020). Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education. *The Physics Teacher*, 58(7), 518–519. <https://doi.org/10.1119/10.0002078>
- Liu, W., Cheok, A. D., Hwee, S., & Ivane, A. (2006). Mixed Reality for Fun Learning in Primary School. *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, June 14–16, Hollywood, California., 1. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1178823>

- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, *E77-D*(12). http://vered.rose.utoronto.ca/people/paul_dir/IEICE94/ieice.html
- Munoz-Cristobal, J. A., Jorin-Abellan, I. M., Asensio-Perez, J. I., Martinez-Mones, A., Prieto, L. P., & Dimitriadis, Y. (2015). Supporting Teacher Orchestration in Ubiquitous Learning Environments: A Study in Primary Education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *8*(1), 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>
- Permana, A. H., Mulyati, D., Bakri, F., Dewi, B. P., & Ambarwulan, D. (2019). The development of an electricity book based on augmented reality technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, *1157*, 032027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/3/032027>
- Silva, R., Oliveira, J.C., & Giraldo, G.A. (2003). Introduction to augmented reality. *Natl. Lab. Sci. Comput.* *11*, 1–11.
- Stern, E., Edelsbrunner, P., Schumacher, R., & Schalk, L. (2015). *Physics instruction in elementary school can boost general experimentation skills*. the 16th Biennial Conference for Research on Learning and Instruction (EARLI), At Limassol, Cyprus. <https://www.researchgate.net/publication/280044259>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P., & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, *108*, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Weatherby, T., Wilhelm, T., Burde, J.-P., Beil, F., Kapp, S., Kuhn, J., & Thees, M. (2020). Visualisierungen bei Simulationen von einfachen Stromkreisen (translated as 'Visualizations for simulations of simple circuits'). *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in Der Gesellschaft von Morgen*, 1007–1010. https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_1007_Weatherby.pdf
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis (translated as 'Students' conceptions on the electric circuit'). In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit (Eds.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht—Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (pp. 115–138). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, *62*, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Zhang, H., Cui, Y., Shan, H., Qu, Z., Zhang, W., Tu, L., & Wang, Y. (2020). Hotspots and Trends of Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality in Education Field. *2020 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (ILRN)*, 215–219. <https://doi.org/10.23919/iLRN47897.2020.9155170>

2.1.3 Praxisideen für AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht der Primarstufe

Im Rahmen der Publikation 5 werden weitere fach-medien-didaktisch rekonstruierte Einsatz-Ideen für AR im Sachunterricht mit naturwissenschaftlichem Fachbezug skizziert. Dabei wurden curricular für die Sekundarstufe anschlussfähige Themen bzw. Inhalte des Sachunterrichts ausgewählt. Die Einsatz-Ideen für AR wurden so konzipiert, dass curricular relevante Konzepte und Vorstellungen in propädeutischer Weise anschlussfähig adressiert und angebahnt werden können. Die skizzierten Einsatz-Idee sollen insbesondere den pädagogisch-didaktisch bedeutsamen Aspekt der semantischen Verschränkung von Realität und Virtualität (vgl. Kapitel 1.3.3) betonen, der bei derzeit für den Bildungsbereich verfügbaren AR-Anwendungen oft nicht oder kaum ausgeprägt ist (vgl. ebd.).

Der Fokus liegt zunächst auf der konzeptionellen Ausgestaltung der Einsatz-Ideen⁸ und weniger auf der technischen Umsetzung dieser. Im Zuge einer eventuellen zukünftigen Umsetzung dieser muss selbstverständlich eine Aushandlung zwischen den konkreten technischen Gestaltungsmöglichkeiten und den hier formulierten pädagogisch-didaktischen Charakteristika erfolgen.

⁸ Inwieweit eine solche Konzeption von (AR-)Lehr-Lern-Tools – zunächst – losgelöst von Überlegungen der technischen Realisierbarkeit entlang des Model of Usefulness of Web-Based Learning environments (Quelle) verortet und begründet werden kann, wird im Fazit (Kapitel 3) erläutert.

Publikation 5: Praxisideen für Augmented Reality (AR) im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹

Art der Publikation: Theoretischer Beitrag in einem Sammelband

Reviewprozess: Einreichung – Zweimalige Überarbeitung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 15.09.2021

Angenommen: 02.06.2022

Publiziert: 13.09.2022

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel, Waxmann Verlag (Bestätigung durch B. Plugge)

Erschienen in: B. Brandt, L. Bröll & H. Dausend (Hrsg.), *Digitales Lernen in der Grundschule III* (S. 227–238). DOI: [10.31244/9783830995913](https://doi.org/10.31244/9783830995913).

Copyright: © 2022, Waxmann Verlag GmbH, Münster

Lizenz: CC BY-NC-SA 4.0 (Namensnennung–Nicht kommerziell–Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International)

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

Luisa Lauer und Markus Peschel

Praxisideen für Augmented Reality (AR) im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht

Abstract

Im Rahmen dieses Beitrags werden Beispiele für den praktischen Einsatz von Augmented Reality (AR) im Sachunterricht der Primarstufe skizziert. Sie dienen sowohl der Veranschaulichung des pädagogisch-didaktischen Potenzials von AR als auch der Veranschaulichung des Transfers zwischen dem fachdidaktischen Einsatz von AR in den Sekundarstufen und dem sachunterrichtsdidaktischen Einsatz von AR in der Primarstufe. Es werden daher auch notwendige bzw. wünschenswerte Entwicklungen von Modellierungen Medialen Lernens – insb. bzgl. AR – aufgezeigt, die eine theoretische Verortung von AR im sachunterrichtsdidaktischen Verständnis von Lehren und Lernen ermöglichen.

1. Einführung

Im Rahmen dieses Beitrags werden Praxisvorschläge für den Einsatz von Augmented Reality (AR) in der Primarstufe aus dem aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand zu fachdidaktischen AR-Anwendungen skizziert. Die dargestellten Beispiele dienen der Exemplifizierung grundsätzlicher Schwierigkeiten beim Transfer zwischen dem fachdidaktischen Einsatz von AR in den Sekundarstufen und dem sachunterrichtsdidaktischen Einsatz von AR in der Primarstufe. Dabei werden Anforderungen, Notwendigkeiten und Hürden für den Einsatz von AR in schulischen Lehr-Lernsituationen für den Sachunterricht spezifiziert und – neben Aspekten der Vielperspektivität – die Besonderheiten des Lernens *mit* und *über* Medien (Peschel, 2020, S. 341) erläutert.

Zunächst werden zentrale Positionen bezüglich des (generellen) Einsatzes digitaler Medien in Lehr-Lernsituationen aus der Sicht der Didaktik des Sachunterrichts dargestellt sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur vornehmlich fachbezogenen Sekundarstufendidaktik herausgestellt. Anschließend wird AR als digitales Medium spezifiziert und definiert. Da es nur wenige Studien speziell zu AR in der Primarstufe gibt, folgt anschließend eine

Darstellung des (vornehmlich sekundarstufen-bezogenen) Forschungsstandes zum Einsatz von AR in Lehr-Lernsituationen mit Fokus auf naturwissenschaftlichen Fachbezug. Aus diesem Forschungsstand werden für den Sachunterricht geeignete Umsetzungen für Lehr-Lernangebote mit AR zu naturwissenschaftlichen Fachbezügen abgeleitet, die als Grundlage für zukünftige forschungs- bzw. praxisbezogene Überlegungen zur Evaluation oder praktischen Umsetzung genutzt werden können. Die Beispiele werden bezüglich der zugrundeliegenden Fachinhalte und möglicher adressierter Kompetenzen eingeordnet und die fachdidaktische Funktion der AR wird skizziert. Zum Schluss wird resümiert, dass es zwar zahlreiche fachdidaktisch gut aufbereitete (Ideen für) Einsatzmöglichkeiten von AR zu isolierten Fachinhalten für den Sachunterricht der Primarstufe gibt, aber bislang noch keine bzw. kaum Forschungen oder technische Entwicklungen, welche dem sachunterrichtlichen Verständnis im Sinne eines Lernens *mit* und *über* AR (Lauer et al., 2020a, S. 385) gerecht werden. Es werden daher notwendige bzw. wünschenswerte Entwicklungen von Modellierungen Medialen Lernens – insb. bzgl. AR – aufgezeigt, die eine theoretische Verortung von AR im sachunterrichtsdidaktischen Verständnis von Lehren und Lernen ermöglichen, sowie Forschungs- und Entwicklungsdesiderate für eine vielperspektivische Auseinandersetzung mit AR in sachunterrichtlichen Lehr-Lernsituationen.

2. Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen zum Einsatz digitaler Medien im (Sach-)Unterricht beschrieben. Anschließend wird Augmented Reality begrifflich verortet und als neues Medium in unterrichtlichen Situationen charakterisiert. Aus dem Forschungsstand zum Einsatz von AR in Lehr-Lernsituationen wird das Desiderat zur Erforschung des Einsatzes von AR in Lehr-Lernsituationen des Sachunterrichts abgeleitet.

2.1 Digitale Medien im (Sach-)Unterricht

Digitale Medien zeichnen sich in Lehr-Lernsituationen durch charakteristische, didaktisch-methodische Möglichkeiten der Gestaltung aus (Peschel, 2016, S. 7). Fachgesellschaften wie die Gesellschaft für Informatik (GI) (2016, S. 1), die Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (2018, S. 1–3), die Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2021, S. 2–4) und Gremien wie die Kultusministerkonferenz (KMK) (2016, S. 3–10) vertreten verschiedene Posi-

tionen bzgl. des Einsatzes digitaler Medien in Lehr-Lernsituationen. Ergänzend dazu fordert die Fachdidaktik (GFD, 2018, S. 1f.), dass neben der medialen Unterstützung fachlichen Lernens auch gleichzeitig die fachliche Grundlegung medialen Lernens erfolgen muss. Insgesamt sollte also eine fach-medien-didaktische (Re-)Konstruktion im Sinne einer Erweiterung der didaktischen (Re-)Konstruktion (Duit et al., 2012, S. 21; Reinfried et al., 2009, S. 406) von Fachinhalten um einen fach-medialen Aspekt stattfinden.

Mit Blick auf die rasante Entwicklung im Bereich der digitalen Technologien und den damit verbundenen Entwicklungen ist festzustellen, dass der didaktische Einsatz innovativer Medien im Sachunterricht der Primarstufe bislang kaum erforscht ist (Irion & Eickelmann, 2018, S. 8). Die Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2021, S. 2–4) stellt in ihrem Positionspapier ‚Sachunterricht und Digitalisierung‘ klar, dass neben dem vielperspektivischen, welterschließenden Verständnis des Lernens (im Allgemeinen) bezogen auf digitale Medien eine gleichzeitige Adressierung des Lernens *mit* und *über* Medien (Peschel, 2020, S. 341) im Sinne der ‚kindlichen Welterschließung‘ (GDSU, 2013, S. 9) von Bedeutung ist. Unter dem Primat des Didaktischen sollen digitale Medien also stets nicht nur als Werkzeug, sondern auch als Gegenstand des Lernens verstanden werden (Peschel, 2016, S. 12). Eine Problematik derzeitiger Modellierungen des Einsatzes digitaler Medien in Lehr-Lernsituationen besteht allerdings darin, dass sie sich stets auf Aspekte der Medienpädagogik bzw. -didaktik beziehen und nur begrenzt der Vielperspektivität des Sachunterrichts genügen (Lauer et al., 2020a, S. 383). Eine entsprechende Weiterentwicklung dieser Modellierungen, die die Unterstützung fachlichen Lernens mit digitalen Medien und *gleichzeitig* die fachliche Grundlegung des Lernens über digitale Medien erlaubt, findet sich in aktuellen Ansätzen (GDSU, 2021, S. 3).

2.2 Augmented Reality als *neues* Medium in Lehr-Lernsituationen

Durch die digitale Technik Augmented Reality (AR) kann die Wahrnehmung der realen Umgebung durch digitale Inhalte angereichert werden (Azuma et al., 2001, S. 34). Ursprünglich wurde AR hauptsächlich als Assistenzsystem im Flugzeugcockpit entwickelt, um Echtzeit-Informationen zur Umgebung im unmittelbaren Sichtfeld einzublenden und dadurch Ablenkungen durch Änderung des Blickfeldes zu reduzieren (Feiner et al., 1992, S. 60). Im Gegensatz zu Technologien wie Virtual Reality (VR) zeichnet sich AR durch eine Verschmelzung von Realität und Digitalität aus, wobei die Hauptbezugsebene, die reale Umgebung, durch digitale Inhalte erweitert wird (Milgram & Kishino,

1994, S. 4). Digitale Abbilder der Realität (z. B. die Kamerasicht in einem mobilen Displaygerät) werden dabei – aus technischer Perspektive – als ‚real‘ definiert (Demarmels, 2012, S. 38) und somit sind in diesem Verständnis nur die digitalen Objekte, die ohne ein AR-fähiges Gerät nicht wahrgenommen werden können, ‚virtuell‘. Die virtuellen Informationen (visueller oder auditiver Art) können räumlich, zeitlich oder semantisch mit den realen Objekten verschränkt sein (Milgram & Kishino, 1994, S. 4).

Aufgrund der beschriebenen Charakteristika von AR ergeben sich spezifische pädagogisch-didaktische Gestaltungsmöglichkeiten in Lehr-Lernsituationen: AR ermöglicht das Wahrnehmen der realen Umgebung und die gleichzeitige Echtzeit-Interaktion mit virtuellen Objekten, daher kann AR als eigenständiges Medium im fach-medien-didaktischen Sinn bezeichnet werden. Eine Verknüpfung fach- und medienbezogener Aspekte durch die Gleichzeitigkeit des Lernens an realen und virtuellen Objekten erfordert die Überarbeitung des gegenwärtigen Verständnisses des medialen Lernens (Lauer et al., 2020a, S. 383). Das deAR-Modell von Seibert et al. (2020, S. 453) liefert speziell für den Einsatz von AR in Lehr-Lernsituationen einen ersten Vorschlag für eine solche Erweiterung und Konkretisierung für die Praxis. Es beschreibt die Planung, Konzeption, Durchführung und Reflexion von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht unter Berücksichtigung von technischen Spezifika, sowie medienpädagogischen, medien- und fachdidaktischen Aspekten von AR in Lehr-Lernsituationen.

Neuere Forschung zur Wirkung von AR in Lehr-Lernsituationen adressieren inzwischen neben den Sekundarstufen auch die Primarstufe (ebd., S. 18). Dabei zeigt sich, dass AR in allen Stufen den Wissens- und Fertigkeitserwerb fördern kann (Garzón & Acevedo, 2019, S. 256) und dass durch den Einsatz von AR Motivation und Interesse positiv beeinflusst werden können (Zhang et al., 2020, S. 218). In Lehr-Lernsituationen animiert AR zur Erkundung der realen Welt nach virtuellen Informationen und regt zur Interaktion mit virtuellen Objekten an (Dunleavy, 2014, S. 32). Durch die Möglichkeit zur Echtzeit-Interaktion mit virtuellen Objekten eröffnen sich neue Möglichkeiten der Individualisierung von Lehr-Lernprozessen durch Echtzeit-Anpassung der Lehr-Lernumgebung an die Handlungen der Lernenden (Anderson & Anderson, 2019, S. 85). Meistens wird AR (nur) genutzt, um in der realen Welt Zusatzinformationen einzublenden (Dede, 2009, S. 68). Mittels spezieller Visualisierungen an Realobjekten können neben Zusatzinformationen zudem Prozesse oder Phänomene sichtbar(er) gemacht werden (Dunleavy, 2014, S. 32). Dennoch wird der praktische Einsatz von AR oft durch technische Probleme erschwert (Munoz-Cristobal et al., 2015, S. 86). Bislang gebräuchliche AR-Lehr-Lernan-

wendungen adressieren vornehmlich Fachinhalte der MINT-Fächer (Majeed & Ali, 2020, S. 26), wobei es Hinweise darauf gibt, dass AR – im Vergleich zu anderen digitalen Medien – insbesondere das Lernen von Technik-Themen positiv beeinflussen kann (Wu et al., 2013, S. 43).

Aufgrund der beschriebenen Forschungen zum Einsatz von AR in Lehr-Lernsituationen der Primarstufe im internationalen Raum besteht insbesondere für den Sachunterricht in Deutschland ein erhebliches Forschungsdesiderat. Darüber hinaus scheint es, dass nicht die Technologie AR selbst über den Lernerfolg entscheidet, sondern deren (fach-)didaktische Implementierung (Wu et al., 2013, S. 47f.). Angesichts der Vielzahl an Entwicklungen von AR-Lehr-Lernanwendungen mit naturwissenschaftlichen Fachbezügen bietet es sich daher an, entsprechende Anwendungen für den Sachunterricht zu konzipieren und zu beforschen. Außerdem muss für den Einsatz von AR in Lehr-Lernsituationen (neben medienpädagogischen und mediendidaktischen Gesichtspunkten) eine fach-medien-didaktische Rekonstruktion des Fachinhalts erfolgen (Lauer & Peschel, 2021, S. 64). Angesichts des vielperspektivischen Verständnisses der Didaktik des Sachunterrichts und der Auffassung von digitalen Medien (auch AR) als *Werkzeug und Gegenstand* des Lernens ist noch zu klären, inwieweit bestehende Modellierungen zum Einsatz von AR, z. B. das deAR-Modell (Seibert et al., 2020, S. 453), begrifflich und konzeptionell auf Lehr-Lernsituationen des Sachunterrichts angewandt werden können.

3. Praxisideen für AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht

Die hier skizzierten Praxisbeispiele sind aus dem Stand der Forschung zu AR mit naturwissenschaftlichem Bezug entstanden. Die Beispiele behandeln spiralcurricular bedeutsame naturwissenschaftliche Themen der Physik, adaptiert als Fachinhalte der naturwissenschaftlichen Perspektive des Sachunterrichts, die im späteren Fachunterricht der Sekundarstufen im Sinne eines spiralcurricularen Verständnisses wiederkehren. Jedes Praxisbeispiel beschreibt konzeptionelle Überlegungen für den konkreten Einsatz einer technischen AR-Entwicklung. Diese können als Grundlage für forschungs- oder praxisbezogene Überlegungen zur empirischen Evaluation oder praktischen Umsetzung verstanden werden.

3.1 Visualisierung von modellhaften Lichtstrahlen

Zum Fachthema ‚Optik‘ ist nach einer Idee von Teichrew & Erb (2020, S. 988) die Visualisierung virtueller modellhafter Lichtstrahlen im Längsschnitt optischer Geräte (z. B. Periskop, Abb. 1) denkbar. Die AR erfüllt dabei die Funktion der Visualisierung schwer beobachtbarer Wege des Lichts durch die Apparatur. Der Weg des Lichts kann dabei ‚sichtbar‘ gemacht werden, ohne Hilfsmittel wie Nebel oder Rauch. Durch diese Visualisierung kann das Verständnis über die Funktionsweise optischer Geräte verbessert werden, weil es keiner Zusatzhandlungen bedarf und damit der Fokus auf den Lerngegenstand gerichtet werden kann. Es bietet sich also eine grundlegende Möglichkeit zur phänomenologischen Anbahnung des Reflexionsgesetzes, welches in der Sekundarstufe weiter behandelt wird.

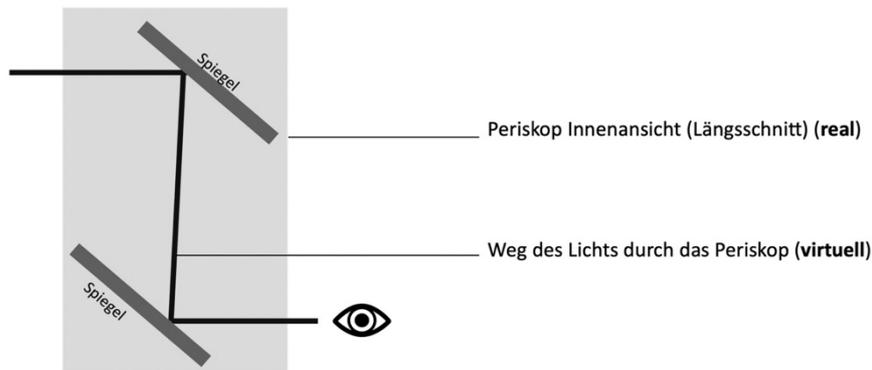


Abbildung 1: Visualisierung modellhafter Lichtstrahlen im Periskop mittels AR

3.2 Visualisierung von elektrischen Schaltsymboliken

Zum Fachthema ‚Elektrik‘ wurde nach einer Idee von Kapp et al. (2019, S. 53) ein Experimentier-Set zur Visualisierung von Schaltsymboliken (Symbole und Schaltskizzen) an elektrischen Bauteilen und Schaltungen (Abb. 2) entwickelt (Lauer et al., 2020b). Die AR erlaubt hierbei eine räumliche und semantische Echtzeit-Verknüpfung der Bauteile und Schaltungen als enaktive Repräsentation mit den passenden Symboliken als ikonische bzw. symbolische Repräsentation (Bruner et al., 1971, S. 29).

Während es bereits (vorwiegend) Steck-Bauteile gibt, mit denen man die Symbole und eine schematische Schaltskizze anbahnen kann, bietet diese AR-Entwicklung die Möglichkeit, entsprechende Symboliken und schematische Schaltpläne in räumlicher Nähe zu konkreten Schaltungen mit elektri-

schen Bauteilen – samt Kabelverbindungen – unabhängig von der räumlichen Anordnung der Teile in Echtzeit zu visualisieren. Dies kann den Abstraktionsprozess von der Schaltung zum Schaltplan unterstützen (E-I-S-Prinzip (Zech, 2002, S. 117)). Elektrische Schaltungen kehren curricular in der Sekundarstufe wieder, wobei dann z.B. weitergehend zwischen Reihen- und Parallelschaltungen unterschieden wird. Eine technische Weiterentwicklung dieses Sets zum Gebrauch in der Sekundarstufe (inkl. Unterscheidung von Reihen- und Parallelschaltung) ist leicht möglich.

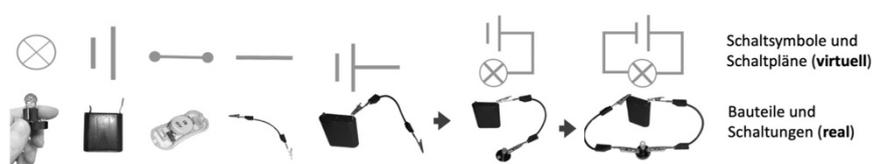


Abbildung 2: Visualisierung von Schaltsymboliken mittels AR

3.3 Visualisierung der Kraftübersetzung

Zum Fachthema ‚Mechanik‘ kann nach der Idee von Enyedy et al. (2012, S. 354–356) und Liu et al. (2011, S. 2–7) die Bewegungsrichtung von Zahnradkomplexen bei mechanischen Apparaturen, z.B. bei einem Uhrwerk (Abb. 3), visualisiert werden. Die Kraftübertragung wird durch ein modellhaftes Fließband symbolisiert, sodass die unterschiedlichen Drehrichtungen der Zahnräder erklärt werden können. Auch die unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten (und Drehmomente) verschieden großer Zahnräder könnten in dieser modellhaften Analogie begründet werden (weil die gleichbleibende Bewegungsgeschwindigkeit des Bandes aufrechterhalten werden muss). Die Kraftübertragung kann sichtbar gemacht werden, ohne eine Kette oder ähnliches in die Apparatur einspannen zu müssen. Hierdurch könnte die Erlangung von phänomenologischem Verständnis über mechanische Zahnradapparaturen gefördert werden. Expliziert und erklärt wird die Funktionsweise von Zahnrädern in der Sekundarstufe durch die Newtonsche Mechanik.

3.4 Visualisierung der Temperatur

Zum Fachthema ‚Thermodynamik‘ kann nach der Idee von Strzys et al. (2018, S. 376) die Temperatur aus Echtzeit-Messdaten, z.B. bei der Erwärmung zweier unterschiedlicher Stoffe in heißem Wasser (Metall-Löffel und Plastik-Löffel) visualisiert werden. Die farbliche Codierung der Temperatur erfolgt aus-

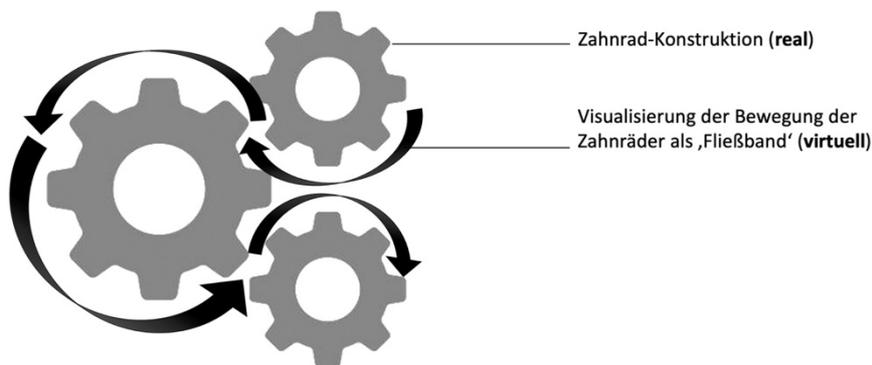


Abbildung 3: Visualisierung der Kraftübersetzung an Zahnrädern mittels AR

schließlich am zu beobachtenden Objekt (im Gegensatz zum Einsatz einer Wärmebildkamera, bei der die gesamte Versuchsanordnung ohne Spezifizierung farblich codiert erscheint). Die reale Umgebung bleibt damit visuell weitgehend erhalten und der Fokus wird auf den Lerngegenstand der verschiedenen Stoffe gelenkt. So könnte das phänomenologische Grundverständnis über Stoffeigenschaften angebahnt werden. Die zentrale Eigenschaft, hinsichtlich derer sich die Löffel in dem Beispiel unterscheiden, ist die curricular in der Sekundarstufe wiederkehrende Wärmeleitfähigkeit.

3.5 Visualisierung der Magnetisierung

Zum Fachthema Magnetismus (als Teil der Elektrik) könnte nach der Idee von Abdusselam & Karal (2020, S. 7–9) und Buesing & Cook (2013, S. 226), der Magnetismus (z. B.) farblich in Echtzeit visualisiert werden. Dies ermöglicht die Differenzierung zwischen Permanentmagneten, Elektromagneten und magnetisierbaren Metallen, bevor die Codierung für die Pole eingeführt wird. Verschiedene metallische Gegenstände, die selbst NICHT gefärbt sind, werden in Echtzeit mit der zugehörigen Magnetisierung farblich mittels AR überlagert. So kann erkannt werden, dass bei Magneten der Magnetismus dauerhaft beständig ist und sich bei Metallen in Gegenwart von Magneten ändert. Dieser Unterschied wird in der Sekundarstufe bzgl. des Zustandekommens von Magnetismus erklärt.

4. Diskussion und Fazit

Im vorigen Kapitel wurden Skizzen für den Einsatz von AR im Sachunterricht der Primarstufe vorgestellt, welche für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht bedeutsam sein könnten und curricular in der Sekundarstufe aufgegriffen werden können. Die Beispiele adressieren (isolierte) monoperspektivische Fachthemen und können als Anhaltspunkte für weitere fachdidaktische Forschung und Entwicklung zu AR im Sachunterricht der Primarstufe angesehen werden. Allerdings muss der Nutzen dieser möglichen Einsatzbeispiele für Kinder im Grundschulalter – vor allem bzgl. des Verständnisses der visualisierten modellhaften Repräsentationen (Kopp & Martschinke, 2010, S. 198) – in AR weitergehend untersucht werden. Bezüglich der Anwendbarkeit von Modellierungen des Einsatzes von AR in Lehr-Lernsituationen, wie dem deAR-Modell (Seibert et al., 2020, S. 453) muss vor allem der Unterschied zwischen dem *fachbezogenen* Einsatz von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufen und dem *sachunterrichtlichen* Einsatz in der Primarstufe beachtet werden. Neben den im deAR-Modell beschriebenen medienpädagogischen, mediendidaktischen, fachdidaktischen und technischen Aspekten der Implementation von AR könnte aus sachunterrichtsdidaktischer Sicht der Aspekt des Mediums (AR) und seiner Bedeutung für bzw. seiner Wirkung auf die Erschließung der Lebenswelt mit einbezogen werden. Auf diese Weise könnten sich zukünftig auch insbesondere Forschungen zum Lernen *über* AR im Sinne einer vielperspektivischen Auseinandersetzung mit den Wirkungen von Augmentierungen im Alltag auf Modellierungen zum Medialen Lernen beziehen.

Literatur

- Abdusselam, M. S., & Karal, H. (2020). The effect of using augmented reality and sensing technology to teach magnetism in high school physics. *Technology, Pedagogy and Education*, 29 (4), 407–424. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1766550>
- Anderson, C. L., & Anderson, K. M. (2019). Wearable Technology: Meeting the Needs of Individuals with Disabilities and Its Applications to Education. In I. Buchem, R. Klamma, & F. Wild (Hrsg.), *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL)* (S. 59–77). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64301-4_3
- Azuma, R., Baillet, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21 (6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>

- Bruner, J. & Oliver, R. & Marks Greenfield, P. (1971). *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Buesing, M., & Cook, M. (2013). Augmented Reality Comes to Physics. *The Physics Teacher*, 51 (4), 226–228. <https://doi.org/10.1119/1.4795365>
- Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323 (5910), 66–69. <https://doi.org/10.1126/science.1167311>
- Demarmels, S. (2012). Als ob die Sinne erweitert würden... Augmented Reality als Emotionalisierungsstrategie. *IMAGE*, 16, 34–51.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction – a framework for improving teaching and learning science*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2848.6720>
- Dunleavy, M. (2014). Design Principles for Augmented Reality Learning. *TechTrends*, 58 (1), 2834.
- Enyedy, N., Danish, J. A., Delacruz, G., & Kumar, M. (2012). Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(3), 347–378. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9150-3>
- Feiner, S., MacIntyre, B. & Dorée Seligmann, D. (1992). Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display. In Booth, K. S. & Fournier, A. (Hrsg.). *Proceedings of the conference on Graphics interface '92* (78–85). San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Garzón, J., & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2013). *Perspektivrahmen Sachunterricht*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU). (2021). *Sachunterricht und Digitalisierung*. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/9es9t7ds> [09.09.2021].
- Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD). (2018). *Fachliche Bildung in der digitalen Welt*. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/kvkerada> [31.08.2021].
- Gesellschaft für Informatik e. V. (Hrsg.). (2016). *Dagstuhl-Erklärung – Bildung in der digitalen vernetzten Welt*. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/p8b5py6t> [31.08.2021].
- Irion, T., & Eickelmann, B. (2018). Digitale Bildung in der Grundschule – 7 Handlungsansätze. *Grundschule*, 7, 7–12.
- Kapp, S., Thees, M., Strzys, M. P., Beil, F., Kuhn, J., Amiraslanov, O., Javaheri, H., Lukowicz, P., Lauer, F., Rheinländer, C., & Wehn, N. (2019). Augmenting Kirchhoff's laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students. *The Physics Teacher*, 57 (1), 52–53. <https://doi.org/10.1119/1.5084931>
- Kopp, B., & Martschinke, S. (2010). Lernvoraussetzungen zum Thema Magnetismus. In K.-H. Arnold, K. Hauenschild, B. Schmidt, & B. Ziegenmeyer (Hrsg.), *Zwischen*

- Fachdidaktik und Stufendidaktik* (S. 189–192). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92475-5_37
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2016). *Bildung in der Digitalen Welt- Strategie der Kultusministerkonferenz*. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/ru78wesc> [09.09.2021].
- Lauer, L., & Peschel, M. (2021). Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen mit Augmented Reality (AR). In C. Maurer, K. Rincke, & M. Hemmer (Hrsg.), *Fachliche Bildung und digitale Transformation – Fachdidaktische Forschung und Diskurse. Fachtagung der Gesellschaft für Fachdidaktik 2020* (S. 64–67). pedocs. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/2pa3mbm2> [10.09.2021].
- Lauer, L., Peschel, M., Bach, S., & Seibert, J. (2020a). Modellierungen Medienlen Lernens. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 382–387). Münster: Waxmann. <https://doi.org/10.301244/9783830992462>
- Lauer, L., Peschel, M., Malone, S., Altmeyer, K., Brünken, R., Javaheri, H., Amiraslavov, O., Grünerbl, A., & Lukowicz, P. (2020b). Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality experiment setup to foster representational knowledge in introductory physics education. *The Physics Teacher*, 58 (7), 518–519. <https://doi.org/10.1119/10.0002078>
- Liu, D. S.-M., Yung, C.-H., & Chung, C.-H. (2011). A Physics-Based Augmented Reality Jenga Stacking Game. *2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/DMDCM.2011.24>
- 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. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2019.650068>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D (12). Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/ua9dce> [31.08.2021].
- Munoz-Cristobal, J. A., Jorin-Abellan, I. M., Asensio-Perez, J. I., Martinez-Mones, A., Prieto, L. P., & Dimitriadis, Y. (2015). Supporting Teacher Orchestration in Ubiquitous Learning Environments: A Study in Primary Education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 8(1), 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>
- Peschel, M. (2016). Mediales Lernen – Eine Modellierung als Einleitung. In M. Peschel (Hrsg.), *Mediales Lernen – Beispiele für inklusive Mediendidaktik* (S. 7–16). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Peschel, M. (2020). Welterschließung als sachunterrichtliches Lernen mit und über digitale Medien – Lernen mit und über digitale Medien als Ausgangspunkt einer umfassenden Sachbildung. In M. Thumel, R. Kammerl, & T. Irion (Hrsg.), *Digitale Bildung im Grundschulalter – Grundsatzfragen zum Primat des Pädagogischen* (S. 341–355). München: kopaed. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/cy5mhysy> [31.08.2021].

- Reinfried, S., Mathis, C., & Kattmann, U. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 27 (3), 404–414.
- Seibert, J., Lauer, L., Marquardt, M., Peschel, M., & Kay, C. W. M. (2020). DeAR: didaktisch eingebettete Augmented Reality. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 451–456). Münster: Waxmann. <https://doi.org/10.301244/9783830992462>
- Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M., Klein, P., Lukowicz, P., Knierim, P., Schmidt, A., & Kuhn, J. (2018). Physics holo.lab learning experience: Using smartglasses for augmented reality labwork to foster the concepts of heat conduction. *European Journal of Physics*, 39 (3), 035703. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aaa8fb>
- Teichrew, A., & Erb, R. (2020). Einsatz und Evaluation eines Augmented Reality-Experiments zur Optik. *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen*, 978–990. Verfügbar unter: <https://tinyurl.com/dh4putry> [31.08.2021].
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Zech, F. (2002) *Grundkurs Mathematikdidaktik, Theoretische und praktische Anleitung für das Lehren und Lernen von Mathematik*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Zhang, H., Cui, Y., Shan, H., Qu, Z., Zhang, W., Tu, L., & Wang, Y. (2020). Hotspots and Trends of Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality in Education Field. *2020 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, 215–219. <https://doi.org/10.23919/iLRN47897.2020.9155170>

2 Technische Möglichkeiten und Grenzen von AR-Technologien für den Einsatz mit Grundschulkindern

2.2.1 Usability von AR-Brillen beim Einsatz mit Grundschulkindern

Verortung in Bezug auf das Thema der Dissertation

Anders als Tablet-AR findet Brillen-AR bislang noch kaum Anwendung in (schulischen) Lehr-Lern-Situationen (Akçayır & Akçayır 2017). Dieser Unterschied begründet sich nicht nur durch ökonomische Argumente wie die hohen Anschaffungskosten, denn, wie bereits gezeigt wurde (vgl. Kapitel 1.3.3), besteht insbesondere in Bezug auf AR-Brillen weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bzgl. der Usability. Besonders groß ist dieses Forschungs- bzw. Entwicklungsdesiderat bei der Zielgruppe Grundschulkindern, da hier die in Kapitel 1.3.3 beschriebenen kognitiven und physischen Unterschiede (vgl. Radu & MacIntyre 2012) zu Erwachsenen (bisherige Zielgruppe der Technologie) bestehen – zumal es auch Indizien dafür gibt, dass Grundschulkindern aktuell (noch) weniger von AR in Lehr-Lern-Situationen profitieren als ältere Lernende (Ozdemir et al. 2018). Angesichts der technologischen Charakteristika bisheriger AR-Brillen wie Microsofts HoloLens (1. Generation) wird vermutet, dass diese Technologie noch nicht hinreichend ausgereift für den Einsatz mit Kindern im Grundschulalter war (vgl. z. B. Munsinger et al. 2019). Technische Weiterentwicklungen bei dem neuesten Modell von Microsoft (HoloLens 2, vgl. z. B. Jannsen 2019) könnten allerdings die Usability im Allgemeinen verbessern (vgl. Kapitel 1.3.3) und insbesondere auch die Nutzung durch Kinder im Grundschulalter erlauben.

Deshalb ist das Ziel der im Rahmen dieses Kapitels beschriebenen Studie eine grundlegende Usability-Evaluation von Microsofts HoloLens 2 mit Kindern im Grundschulalter. Dabei wurde kein fachlicher Anwendungskontext zugrunde gelegt; die Untersuchung fokussierte ausschließlich die Evaluation der Usability des Geräts bzw. den Vergleich verschiedener in AR verfügbarer Interaktionsmodi bzgl. ihrer Effizienz und der Präferenz der Kinder. Zusätzlich wurde eine – für den Rahmen der Dissertationsschrift eher als Exkurs zu interpretierende – Untersuchung des Einflusses des AR-Geräts auf die aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen (vgl. z. B. Pekrun 2006; Pekrun et al. 2011) „Freude“, „Langeweile“ und „Frustration“ durchgeführt, welche an bisherige Befunde zur Wirkung von AR auf ebenjene aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen (vgl. Kapitel 1.3.3) anknüpfen soll.

Die Studie adressiert demnach die folgenden Forschungsfokusse bzgl. der Nutzung von Microsofts HoloLens 2 durch Kinder im Grundschulalter:

- Untersuchung der **von den Kindern eingeschätzten Usability** des Geräts
- Vergleich der auf dem Gerät verfügbaren Interaktionsmodi in AR bzgl. ihrer **Effizienz**

- Untersuchung der **Interaktionspräferenz** der Kinder in AR
- Untersuchung der Veränderung von **aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen** bei den Kindern durch die Nutzung des Geräts

Methodologische und methodische Erläuterungen

Studiendesign und Stichprobe: Für die Studie wurde ein **quantitativer Ansatz** gewählt, da die adressierten Forschungsfokusse vornehmlich auf das Messen bzw. Zählen von Größen abzielten (vgl. Aeppli et al 2016: 112, 115). Außerdem wurde insbesondere wegen der Untersuchung der Interaktionspräferenzen der Kinder in AR ein **nicht-experimentelles within-Design** (Sedlmeier & Renkewitz 2018: 154 ff) gewählt, damit die Teilnehmenden alle Interaktionsmodi in AR kennenlernen und vergleichen können. In die Stichprobe wurden zwecks Adressierung des Grundschulalters Kinder von der zweiten bis zur sechsten Klasse aufgenommen.

Datengewinnung: Zur Messung der **von den Kindern eingeschätzten Usability** der HoloLens 2 wurde das erprobte und häufig in der Usability-Forschung eingesetzte Instrument „System Usability Scale“ (Brooke 1996) verwendet. Es handelt sich um ein subjektzentriertes (vgl. z. B. Pospeschill 2013: 94) Messinstrument mit zehn Items, wobei jedes Item eine Aussage beinhaltet, zu welcher eine von fünf Zustimmungs- bzw. Ablehnungsstufen auf einer Likert-Skala (vgl. z. B. ebd.: 115 f) auszuwählen ist.

Zur Messung der **Effizienz** der auf dem Gerät verfügbaren Interaktionsmodi in AR wurden die durchschnittliche Anzahl an benötigten Versuchen sowie die durchschnittliche benötigte Zeit von jeweils drei Ausführungen eines „Auswahlbefehls“ in jedem der drei Interaktionsmodi als objektzentrierte Maße (vgl. z. B. ebd.: 94) herangezogen.

Zur Messung der **Interaktionspräferenz** in AR wurden den Teilnehmenden die auf HoloLens 2 verfügbaren Interaktionsmodi im Anschluss an die Benutzung des Geräts erneut gezeigt und erklärt unter Zuhilfenahme dreier Grafiken (s. „Figure 2“ auf Seite 7 in der Publikation 6). Die Teilnehmenden wurden dann gebeten, die Interaktionsarten nach Präferenz zu ranken und Begründungen für ihre Entscheidungen zu geben. Alle Antworten wurden von den Teilnehmenden mündlich mitgeteilt und daraufhin von der Versuchsleitung schriftlich festgehalten.

Zur Messung der **aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen** wurden drei Items mit einer fünffach gestuften Likert-Skala (vgl. z. B. ebd.: 115 f) zur Erstellung eines subjektzentrierten (vgl. z. B. Pospeschill 2013: 94) Fragebogens verwendet, wobei je ein Item zu einer der Emotionen „Freude“, „Frustration“ bzw. „Langeweile“ aus dem Testinstrument von

Riemer & Schrader (2019) aufgenommen wurde. Die Teilnehmenden füllten den Fragebogen vor und nach der Benutzung des Geräts aus. In der Pilotierungsphase der Studie fiel auf, dass die meisten Teilnehmenden bereits vor der Benutzung der AR-Brille die höchsten Antwortoptionen der Skala auswählten. Somit fiel der Vergleich mit den Antworten nach der Benutzung der Brille trivial aus aufgrund der Gleichheit der Daten. Daher wurde die Formulierung der Items im Post-Test modifiziert. Nähere Erläuterungen dazu finden sich in der Publikation 6.

Datenanalyse: Aus den Antworten der Teilnehmenden im Fragebogen „System Usability Scale“ (Brooke 1996) wurde das Maß für die **empfundene Usability**, der „System Usability Score (SUS)“ (ebd.) als deskriptive Größe berechnet: Alle Items wurden (unter Berücksichtigung negativer Item-Formulierungen) gleich gewichtet und addiert, wobei der Wert so angepasst wurde, dass sein Maximum 100 beträgt (ebd.: 5). Die Antworten auf der fünfstufigen Likert-Skala werden aufsteigend mit 1–5 Punkten versehen und der SUS wurden wie folgt berechnet (ebd.):

$$SUS = (X + Y) \cdot 2,5, \text{ wobei}$$

$$X = \left(\sum \text{Punktzahlen der positiv formulierten Items} \right) - 5$$

$$Y = 25 - \left(\sum \text{Punktzahlen der negativ formulierten Items} \right)$$

Ab einem Score über 80,3 kann auf eine „exzellente“ Usability geschlossen werden; 68 markiert die untere Grenze des sich anschließenden Bereichs von „guter“ Usability. Scores kleiner als 58 lassen auf eine unzureichende Usability schließen (Bangor et al. 2009).

Die drei Interaktionsmodi der HoloLens 2 wurden bzgl. ihrer **Effizienz** mit einem inferenzstatistischen Verfahren (vgl. z. B. Aeppli et al. 2016: 308) verglichen, wobei für die beiden Effizienzmaße (durchschnittliche benötigte Anzahl an Versuchen und durchschnittliche benötigte Zeit für einen Befehl) jeweils eine separate, aber von der Verfahrensweise identische Analyse durchgeführt wurde. Die drei Interaktionsmodi in AR wurden dabei als drei Messzeitpunkte bei derselben Person modelliert. Dementsprechend entstanden die Datensätze aus verbundenen Stichproben mit Messwiederholung (Sedlmeier & Renkewitz 2018: 154 ff). Da die Daten das Kriterium der Normalverteilung nicht erfüllten, wurde auf ein nicht-parametrisches Verfahren (Pospeschill 2013: 197, 249 f) zurückgegriffen: Bei mehr als zwei verbundenen Stichproben und mindestens ordinalskalierten Daten wird der Rangtest nach Friedman (1937) zur Untersuchung auf Unterschiede herangezogen (McCrum-Gardner 2007: 40). Die Nullhypothese des Tests ist die Annahme, dass die abhängigen Stichproben sich bzgl. ihrer zentralen Tendenzen nicht

unterscheiden. Bei dem Verfahren werden unter den Daten eines Messzeitpunktes Ränge verteilt nach der Größe der Zahlenwerte (Friedman 1937). Die Prüfgröße wird durch folgende Teststatistik χ_r^2 (ebd.) ermittelt und bei verbundenen Rängen (also, wenn bei mehrfach auftretenden Messwerten innerhalb eines Messzeitpunktes ein gemeinsamer, gemittelter Rang zugewiesen wird) mit entsprechender Korrektur $\chi_{r(corr)}^2$ (Lehmann & d’Abrera 2006) versehen:

$$\chi_r^2 = \frac{12}{n \cdot k \cdot (k+1)} \cdot \sum_{i=1}^k R_i^2 - 3 \cdot n \cdot (k+1) \quad \text{und} \quad \chi_{r(corr)}^2 = \frac{\chi_r^2}{1 - \frac{1}{n \cdot k \cdot (k^2-1)} \cdot \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}$$

Hierbei stehen k für die Anzahl der Messwiederholungen, n für die Stichprobengröße, R_i für die Rangsumme des i -ten Messzeitpunktes, m für die Anzahl der Fälle, in denen verbundene Ränge auftraten und t_j für die Anzahl der Datenwerte auf dem j -ten Rang. Schließlich wird der Wert der Prüfgröße unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade df ($df = k - 1$) mit einem für ein bestimmtes Signifikanzniveau kritischen Wert verglichen (vgl. z. B. Aepli et al. 2016: 310 ff), um über ein Verwerfen bzw. nicht-Verwerfen der Nullhypothese zu einem bestimmten Signifikanzniveau zu entscheiden. Bei signifikanten Unterschieden (Effekten) überprüft die verwendete Software zur statistischen Datenanalyse (SPSS) mittels Dunn-Bonferroni-Tests (Sedlmeier & Renkewitz 2018: 433 f) in paarweisen Post-Hoc-Vergleichen Unterschiede zwischen einzelnen Messzeitpunkten. Durch die Berechnung der Effektstärke (vgl. z. B. Aepli et al. 2016: 315; Pospeschill 2013: 108 f) kann das relative Ausmaß von Effekten eingeschätzt werden und damit der Effekt im Hinblick auf seine praktische Relevanz interpretiert werden. Bei den Post-Hoc-Vergleichen nach einem Friedman-Test wird meist Cohen’s r als Effektstärkemaß verwendet (Sedlmeier & Renkewitz 2018: 481 f), wobei Werte unter .3 auf einen kleinen Effekt hinweisen, Werte zwischen .3 und .5 auf einen mittleren Effekt und Werte über .5 auf einen großen Effekt (Lenhard & Lenhard 2017).

Aus den Rankings der Teilnehmenden zur **Interaktionspräferenz** in AR wurden durch Zählen (Pospeschill 2013: 91 f) die Häufigkeiten für die Wahl jedes Interaktionsmodus als „am meisten favorisiert“ und als „am wenigsten favorisiert“ bestimmt. Die Begründungen der Teilnehmenden für die jeweiligen Bewertungen wurden durch eine zusammenfassende, qualitative Inhaltsanalyse (ausführliche Erläuterung dieser Methode in Kapitel 2.3.2) paraphrasiert und resümiert.

Die Daten aus den Fragebögen der Prä- und Postbefragung zu den **aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen** wurden mit einem inferenzstatistischen Verfahren (vgl. z. B. Aepli et al. 2016: 308) verglichen, wobei für alle drei Emotionen „Freunde“, „Frustration“ und „Langeweile“ eine separate, aber bzgl. der Verfahrensweise identische Analyse vorgenommen

wurde. Prä- und Postbefragung wurden dabei als zwei Messzeitpunkte modelliert, sodass auch diese Datensätze als von verbundenen Stichproben stammend zu charakterisieren sind. Da auch hier die Daten keine Normalverteilung aufwiesen, wurde erneut ein nicht-parametrisches Verfahren (Pospeschill 2013: 197, 249f) verwendet. Bei zwei verbundenen Stichproben und mindestens ordinal skalierten Daten wird der Wilcoxon-Rangsummentest (vgl. z. B. Sedlmeier & Renkewitz 2018: 581 ff) herangezogen. Das Vorgehen beim Wilcoxon-Rangsummentest ähnelt dem des t-Tests, wobei – wie auch beim zuvor beschriebenen Test nach Friedman – zunächst unter den Differenzen zwischen Messwertepaaren Rangplätze vergeben werden und ein Vorzeichen zugewiesen wird je nach Wert der Differenz. Die Nullhypothese dieses Tests ist, dass die Summe der positiven Rangplätze und die Summe der negativen Rangplätze sich nicht unterscheiden (daraus würde folgen, dass keine Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten bestünden). Also werden diese beiden Summen berechnet, wobei der Wert der kleineren Summe dann als Prüfgröße T verwendet wird. Durch Vergleich von T mit einem (i. d. R. aus Tabellen entnehmbaren) kritischen T-Wert für eine bestimmte Stichprobengröße kann die Signifikanz zu einem gewählten Niveau bestimmt werden (ebd.: 582 ff).

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt zeigt sich durch die Studie, dass die Usability von Microsofts HoloLens 2 höher zu sein scheint als die des Vorgängermodells (vgl. z. B. Munsinger et al. 2019). Allerdings ist die Usability noch nicht „exzellent“ (Bangor et al. 2009). Dies wäre für den Einsatz in Lehr-Lern-Situationen von Vorteil da so eine eventuelle zusätzliche kognitive Belastung durch die Bedienung bzw. Benutzung des Geräts minimiert werden könnte (vgl. Kapitel 1.3.3). Auch die bzgl. ihrer Effizienz verglichenen Interaktionsmodi in AR sind von HoloLens zu HoloLens 2 deutlich effizienter geworden (Munsinger et al. 2019) bzw. die neue „direkte“ Interaktion über Tippen auf virtuelle Objekte scheint effizienter als die anderen Modi der HoloLens 2 zu sein. Jedoch müssen weitere Anpassungen – insbesondere solche, die die physischen Besonderheiten von Kindern im Vergleich zu Erwachsenen betreffen – vorgenommen werden, bevor das Gerät verlässlich von Kindern im Grundschulalter benutzt kann.

Die Befunde zur Interaktionspräferenz und die zu den aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen, die im Rahmen dieser Studie gewonnen wurden, gehen einher mit den Befunden bisheriger Studien zur Nutzung bzw. Wirkung von AR (in Lehr-Lern-Situationen) (vgl. Bacca et al. 2018; Chiang et al. 2014; Di Serio et al. 2013; Jara et al. 2011; Bujak et al. 2013; Chang et al. 2015; Kuhn et al. 2016; Radu 2014 für aktivitätsbezogene Leistungsemotionen bzw. Oviatt & Cohen 2015 für Interaktionspräferenzen).

Die in der Studie vollzogene Analyse bzw. der Vergleich der Interaktionsmodi in AR bzgl. ihrer Effizienz beschränkte sich auf die ersten drei Interaktionsversuche der Teilnehmenden in jedem Interaktionsmodus (da das verwendete Tutorial eine dreimalige Ausführung des Auswahlbefehls in jedem Interaktionsmodus beinhaltet). In anschließenden Studien könnte untersucht werden, inwieweit die Effizienz der Interaktionsmodi in AR (im Vergleich) sich ändert bei längerer Benutzung des Geräts (und damit einhergehend einer deutlich häufigeren Ausführung dieses Auswahlbefehls in den verschiedenen Interaktionsmodi). Wir gehen davon aus, dass (wie auch bei anderen Technologien) der Umgang mit einem Gerät bzw. mit spezifischen Features (sowohl von Lehrenden wie auch von Lernenden) zunächst erlernt werden muss (vgl. Zender et al. 2018), sodass sich mit zunehmender Beschäftigung(-sdauer) die Effizienz der Interaktionsmodi weiter verbessern könnte und Unterschiede zwischen den Interaktionsmodi verringert werden könnten.

Ein weiterer zu diskutierender Aspekt ist die Aussagekraft der mittels subjektzentrierter Fragebögen gewonnenen Daten zur empfundenen Usability und zum prä-post-Vergleich der aktivitätsbezogenen Leistungsemotionen. Es gibt zwar Befunde zur Fähigkeit von Kindern zur retrospektiven Einschätzung (bei Fragebögen) (Metcalf & Finn 2013) allerdings gibt es auch Befunde, die die Validität von Selbsteinschätzungen bei jungen Kindern infrage stellen bzw. anzweifeln lassen (vgl. z. B. Chambers & Johnston 2002). Dazu kommt, dass junge Kinder Schwierigkeiten beim Verständnis komplexer und / oder negativ formulierter Items zu haben scheinen (Marsh 1986) und dass sie dazu zu neigen scheinen, (zu) extreme Antwortoptionen zu wählen (Chambers & Craig 1998). Diesen Schwierigkeiten wurde zwar durch extensive Pilotierung der verwendeten Fragebögen bestmöglich entgegengewirkt, allerdings könnte die Aussagekraft der Befunde durch die genannten Problematiken dennoch eingeschränkt sein. Nicht zuletzt deswegen wird im Abschnitt „5. Conclusions“ (s. Seite 13 der Publikation 6) darauf hingewiesen, dass weitere Forschung mit dem Ziel der Verifikation bzw. Ergänzung der im Rahmen dieser Studie gewonnenen Befunde vonnöten sein wird. Sich anschließende Studien könnten außerdem die hier gewonnenen Befunde für schärfer getrennte Altersgruppen untersuchen, anstatt mit der großen Altersspanne in der Stichprobe. Beispielsweise könnten sich Kinder im Alter von sechs bis sieben Jahren stark unterscheiden bzgl. des Interaktionsverhaltens in AR oder bzgl. ihrer Fähigkeit zur Einschätzung der Usability (vgl. z. B. Hanna et al. 1997: 10).

Publikation 6: Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Kristin Altmeyer², Sarah Malone², Michael Barz^{3,4}, Roland Brünken², Daniel Sonntag^{3,4}, Markus Peschel¹

Art der Publikation: Forschungsbeitrag in einer Fachzeitschrift

Reviewprozess: Einreichung – Überarbeitung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 31.08.2021

Angenommen: 30.09.2021

Publiziert: 05.10.2021

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Kristin Altmeyer, Sarah Malone, Michael Barz, Roland Brünken, Daniel Sonntag, Markus Peschel

Erschienen in: *Sensors*, 21(19), 6623 (20 Seiten), DOI: [10.3390/s21196623](https://doi.org/10.3390/s21196623).

Copyright: © 2021, Die Autor*innen; Lizenznehmer: MDPI, Basel Switzerland

Lizenz: CC BY 4.0 (Attribution 4.0 International)

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts, Haupt-Planung der Studie, Durchführung der Studie, Haupt-Datenauswertung

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Kristin Altmeyer:	Mit-Verfassung des Manuskripts, Beratung bei der Datenauswertung
Sarah Malone:	Mit-Verfassung des Manuskripts, Beratung bei der Datenauswertung
Michael Barz :	Mit-Verfassung des Manuskripts, Beratung bei der Datenauswertung
Roland Brünken:	Konzeptionelle Beratung und Unterstützung
Daniel Sonntag:	Konzeptionelle Beratung und Unterstützung
Markus Peschel:	Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

²Universität des Saarlandes, Empirische Bildungsforschung

³Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken

⁴Universität Oldenburg, Applied Artificial Intelligence

Communication

Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children

Luisa Lauer ^{1,*}, Kristin Altmeyer ², Sarah Malone ², Michael Barz ^{3,4}, Roland Brünken ², Daniel Sonntag ^{3,4} and Markus Peschel ¹

¹ Department of Physics, Campus C6.3, Saarland University, 66123 Saarbrücken, Germany; markus.peschel@uni-saarland.de

² Department of Education, Campus A4.2, Saarland University, 66123 Saarbrücken, Germany; kristin.altmeyer@uni-saarland.de (K.A.); s.malone@mx.uni-saarland.de (S.M.); roland.brueken@uni-saarland.de (R.B.)

³ German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI), Interactive Machine Learning Department, Stuhlsatzenhausweg 3, Saarland Informatics Campus D3_2, 66123 Saarbrücken, Germany; michael.barz@dfki.de (M.B.); daniel.sonntag@dfki.de (D.S.)

⁴ Applied Artificial Intelligence, Oldenburg University, Marie-Curie-Str. 1, 26129 Oldenburg, Germany

* Correspondence: luisa.lauer@uni-saarland.de; Tel.: +49-681-302-71397



Citation: Lauer, L.; Altmeyer, K.; Malone, S.; Barz, M.; Brünken, R.; Sonntag, D.; Peschel, M. Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children. *Sensors* **2021**, *21*, 6623. <https://doi.org/10.3390/s21196623>

Academic Editors: Vittorio M. N. Passaro and Christoph M. Friedrich

Received: 31 August 2021
Accepted: 30 September 2021
Published: 5 October 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Augmenting reality via head-mounted displays (HMD-AR) is an emerging technology in education. The interactivity provided by HMD-AR devices is particularly promising for learning, but presents a challenge to human activity recognition, especially with children. Recent technological advances regarding speech and gesture recognition concerning Microsoft's HoloLens 2 may address this prevailing issue. In a within-subjects study with 47 elementary school children (2nd to 6th grade), we examined the usability of the HoloLens 2 using a standardized tutorial on multimodal interaction in AR. The overall system usability was rated "good". However, several behavioral metrics indicated that specific interaction modes differed in their efficiency. The results are of major importance for the development of learning applications in HMD-AR as they partially deviate from previous findings. In particular, the well-functioning recognition of children's voice commands that we observed represents a novelty. Furthermore, we found different interaction preferences in HMD-AR among the children. We also found the use of HMD-AR to have a positive effect on children's activity-related achievement emotions. Overall, our findings can serve as a basis for determining general requirements, possibilities, and limitations of the implementation of educational HMD-AR environments in elementary school classrooms.

Keywords: head-mounted displays; augmented reality; human activity recognition; usability; elementary education

1. Introduction

Augmented reality (AR) is an emerging technology in education that enables real-time integration of real and virtual objects in the field of view [1,2]. The real world represents the main channel of perception, and virtual objects are spatially and/or semantically connected to real objects [3]. In educational settings in particular, this offers a great potential to enhance learning processes and, therefore, there is a high interest in the development and research of AR-environments and devices in this context. In particular, head-mounted displays enable an engaging interaction with real and virtual objects. Recent review studies and meta-analyses have confirmed the general benefits of AR-applications for learning [4–6]. However, it is noticeable that children of elementary school age benefit less than older students [7]. The usability of the applied devices seems to play a significant role in the success of AR-applications [8]. Technology for the recognition of user activities and behavior is referred to as 'human activity recognition' (HAR) technology [9,10]. It is

suspected that HAR of AR-devices such as Microsoft's HoloLens (first generation) was not yet technologically mature enough to enable interference-free learning in younger children. However, AR-technology has evolved and may be able to make up for the shortcomings of the past, allowing the potential for AR to be suitable for younger students. Therefore, the current study aimed to test the usability of the HoloLens 2 for elementary school students and to provide an empirical basis to decide whether it is worthwhile to develop school-related learning scenarios for the device. In addition, we examined which of the offered multimodal interaction modes can be handled best by the students.

1.1. Theoretical and Empirical Background for the Use of HMD-AR in Education

Following Santos et al. [11], the overlay of the physical world with external representations through AR enables situated multimedia learning. Based on this approach, through AR it is attempted to combine the best of two worlds: situated active learning in a meaningful real-world environment and virtual learning environments carefully designed according to the principles of the Cognitive Theory of Multimedia Learning [12]. Initial studies indicate that through fulfilling the spatial contiguity principle, AR-based learning environments can reduce cognitive load [13,14] and increase learning gains [15]. Moreover, Szajna et al. [16] found that HMD-AR-based applications for training can significantly reduce the time required to perform tasks.

Most educational AR-applications are designed for handheld display-devices like smartphones or tablets, while head-mounted display AR-devices (HMD-AR-devices) are used rarely [4]. Nevertheless, HMD-AR-devices provide several advantages when used in educational settings. In contrast to handheld devices, learners wearing see-through HMD-AR-devices experience a seamless merge of virtual and physical worlds. From the perspective of multimedia learning, this should facilitate the creation of meaningful cognitive relations between virtual information and the physical environment, improving learning outcomes [12,17]. Moreover, unlike handheld display-devices, HMD-AR-devices allow for freehand interaction with physical as well as virtual objects [18]. This becomes particularly useful for learning settings based on physical activities, like laboratory work, which requires learners to use both of their hands [19]. Theories of embodied cognition suggest that bodily interactions with a learning task, such as hand and finger gestures, can support cognitive processes [20]. Furthermore, Korbach et al. [21] used 2D multimedia learning material to show that using the index finger for pointing and tracing related information influences a learner's focus of visual attention and promoted the learning process. Since HMD-AR-based learning environments enable the presentation or adaptation of learning information based on a learner's gesture or action in real-time, positive effects of embodied cognitions are expected to be particularly strong [22].

According to Yuen et al. [23], educational AR-applications can be designed for discovery-based learning (DBL), object modelling (OM), game-based learning (GBL), for the teaching of specific skills in training, or they can be integrated into distinct educational AR-books, with GBL and OM being the most frequently addressed purposes of educational AR-applications [24]. AR in education can help learners to conduct authentic explorations in the real world by displaying virtual elements [25], and can facilitate the observation of processes that cannot be perceived with the naked eye [26]. Further, AR opens new opportunities for the individualization of the learning process through real-time interaction between reality and virtuality as real-time reaction and adaptation to the learner's actions [27]. For instance, recent technological advances enable the augmentation of relevant real objects that were fixated by a learner [28]. Besides promoting the acquisition of knowledge and skills [5,29], AR can positively influence curiosity [30] as well as motivation and interest [31] in educational situations. Motivation and interest are known to be modulated by so-called activity emotions, which, as a type of achievement emotions, concern ongoing achievement-related activities [32,33]. While positive, activating emotions (e.g., enjoyment) are assumed to promote motivation and interest, negative, rather deactivating emotions (e.g., boredom),

are associated with their decline. Therefore, emotions such as enjoyment, boredom, etc. are referred to as 'activity-related achievement emotions'.

However, the use of AR in education can be obstructed by technical issues and can require additional instruction [34]. Hence, well-designed user interfaces in AR-applications are essential for successful learning [35]. Due to the prevailing research gap concerning the use of HMD-AR-devices and applications in education, as well as ongoing technical advancements concerning HMD-AR-devices, further research is required to validate the existing results and to investigate the effects of HMD-AR on the learning process.

1.2. Usability of HMD-AR-Devices in Education

In order for AR-devices to exert their positive impact on information processing during learning, the handling and interaction with the device itself or with the virtual learning information offered must not itself lead to load on the learners as described in the previous Section. According to several reviews on AR in education, an often-reported issue concerning the practical use of AR-devices and applications in educational situations is the underwhelming usability [4,36,37]. The (technical) usability of an educational technology-supported setting, which comprises technically conditioned aspects of use and operation, influences the overall usefulness of a learning application [38]. While good usability of educational AR-applications facilitates learning, poor usability can even hamper learning processes [39]. Further, Papakostas et al. [40] found the usability to be the strongest predictor of the behavioral intention to use an AR-application for training. For HMD-AR-devices, a poor performance of the user activity recognition concerning the detection of operation commands can impact usability, as the device is operated through gesture- or voice-based interaction [41]. This aspect is more important when using the devices with young children, as their physical body characteristics (e.g., hand size, arm length, voice pitch) differ from adults [42], for whom the devices are currently designed and calibrated. Previous research concerning the (technical) usability of HMD-AR-devices focused mainly on Microsoft's HoloLens (first generation) and samples of adults. An evaluation of the device for the purpose of an assembly application for manufacturing [18] found the device to be applicable, but also revealed that the spatial mapping required improvement. Munsinger et al. [43] used the Microsoft HoloLens (first generation) to investigate its usability for a target group of elementary school children. They compared three AR-interaction modes provided by HoloLens ('remote clicker', 'air-tap', 'voice command') in their efficiency using the measures 'input errors', 'tutorial time' and 'game time', and found that the 'voice command'-interaction performed significantly worse than the other two. Their findings are in line with rather poor performance occurring for interactive devices with voice-based operation in general [41,44]. Besides their physical body characteristics, the children's individual state of cognitive development concerning motoric skills and spatial cognition [42] may affect the usability of HMD-AR-devices.

For many applications, multimodal interfaces have long been recognized to be more robust, accurate, and preferred by users than unimodal ones. A major benefit is that users can freely choose their preferred modality combination [45]. However, this requires the ability to make a good modality choice, because ineffective interaction modalities may lead to unsatisfactory results [46]. Still, multimodal interfaces are considered to be "especially well-suited for applications like education, which involve higher levels of load associated with mastering new content" [47] (p. 33). As the HoloLens 2 offers different means to multimodally interact in AR, we investigate the preferred modality choices of elementary school children. So far, investigations on children's handling with the revised interaction modes of the latest HoloLens 2 are still pending.

1.3. The Microsoft HoloLens 2 and Its Potential for Education

Announced innovations and improvements concerning the spatial positioning, speech, and gesture recognition for the successor model HoloLens 2 by Microsoft (see Figure 1) do not only make it necessary to investigate the applicability of existing findings for the new

device. The new device could further represent an important step towards user-friendly HMD-AR-applications for educational purposes, especially for young children.

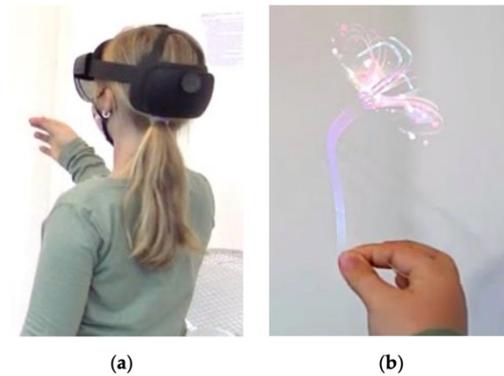


Figure 1. Child interacting with a virtual object in AR using Microsoft's HoloLens 2. (a) external view; (b) child's point of view.

The HoloLens 2 offers various means to interact in AR. To describe these modes of interactions, we will focus on the action 'selection of an AR-object' from the tutorial that is pre-installed on the device (see Video S1a). The AR-object to select in the tutorial was a shimmering gemstone. On the one hand, there are gesture-based interactions: To select the AR-gemstone with a gesture-based interaction, one can either tap directly on the gemstone (newly implemented 'tap'-interaction, see Figure 2a and Video S1a) or one can aim at the gemstone from a distance with the open palm and then tap with the thumb and index finger ('air-tap'-interaction, see Figure 2b and Video S1a). On the other hand, there is voice-and-gaze-based interaction: To select the AR-gemstone, one can also look at the gemstone and say 'select' ('voice command'-interaction, see Figure 2c and Video S1a). In total, two gesture-based and one voice-and-gaze-based interaction mode are available for AR-interaction on the HoloLens 2.

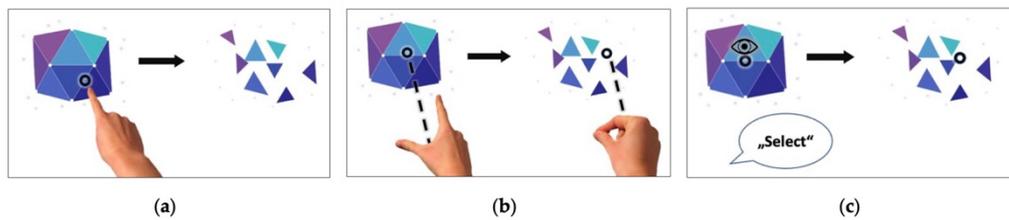


Figure 2. AR-interaction modes provided by HoloLens 2. (a) 'tap'; (b) 'air-tap'; (c) 'voice command'.

1.4. Ethics of Using HMD-AR Devices in Elementary Education

Children are vulnerable and it is the responsibility of adults to protect them from possible harm. Technologies in research on children should therefore be applied very prudently. Particularly when using immersive technologies, such as AR and virtual reality (VR), special precautions should be taken [48]. To ensure that the psychological and cognitive state of the target group was taken into account, our research team included experts in the fields of infant mental development (psychologists) and elementary school pedagogy (teachers and researchers). These considerations led us to gently introduce the

children to the technology: we first showed them the device and explained how it works in a child-friendly way. While they were using the smartglasses, an experimental supervisor was always on hand to help them. We also monitored the physical well-being of the children [49] by asking them repeatedly whether they experienced any discomfort in terms of simulator sickness. Moreover, the virtual content of the AR environment used does not contain frightening or startling elements. To protect the children's data (e.g., eye movement recordings [50]), we used a private offline Wi-Fi to enable Mixed Reality Capture.

1.5. Aim of the Study

Our aim is to assess the usability of Microsoft's HoloLens 2 as the latest HMD-AR-device for the use with elementary school children. The device is not yet technically designed for use with children younger than 13 years: young children's lower interpupillary distance might hamper the perception of virtual objects [51]. Therefore, we want to explore how usable the device is in its current state, and which technical adaptations need to be carried out before the device can be successfully used with young children, following similar evaluations for the predecessor model by Munsinger et al. [43]. We want to gain an insight into the general challenges and benefits that can serve as baseline findings once the device is used in educational applications. Our main research focuses concerning the use of the device are:

1. Evaluation of the overall usability of the HoloLens 2 as an HMD-AR-device;
2. Comparison of the provided AR-interaction modes concerning their efficiency;
3. Assessment of the children's interaction preference in HMD-AR;
4. Examination of the change in activity-related achievement emotions.

2. Materials and Methods

2.1. Sample

We invited 47 students (29% female, age: $M = 9.3$ years; $SD = 0.9$ years, 2nd to 6th grade) to participate in a laboratory study at the Saarland University. They took part in another study at the same day (either before or after attending this study), but the other study did not include the use of an HMD-AR-device. None of the children had previous experience with AR. In the beginning, we conducted test runs with four children (for procedure and instruction refinement, without data collection), so $n = 43$ valid data sets were collected.

2.2. Study Design

The study was conducted using a within-subjects design. The independent variable was interaction mode, and the modes were modeled as different measuring points. The different multimodal AR-interaction modes provided by HoloLens 2 ('tap', 'air-tap', and 'voice command') were compared regarding the dependent variables 'mean number of attempts' and 'mean time'. For the children's personal interaction preference in AR, we formed the variables 'most favorite interaction mode' and 'least favorite interaction mode'. The most and the least favorite interaction mode can be 'tap', 'air-tap' or 'voice command'. To investigate general effects of HMD-AR-usage on activity-related achievement emotions, we formed a pre- and a post-test variable for 'enjoyment', 'boredom' and 'frustration'. To assess the overall device usability, we formed the variable 'system usability score'.

2.3. Procedure and Data Collection

Due to the COVID-19 situation, only individual appointments with private journeys could be made. Prior to the start of the study, parents were informed about the investigation and gave their written consent for their children's study participation. The procedure of the study was centered around a standardized tutorial on interaction in HMD-AR on the HoloLens 2 in German language. Before starting the tutorial, we assessed the children's enjoyment, boredom and frustration. These activity-related achievement emotions are assumed to allow for inferences about motivation and interest [32,33] (variables 'enjoyment-

pre', frustration-pre', 'boredom-pre'). Each emotion was assessed using a single item adapted for children from Riemer and Schrader [52] (see Appendix A and Document S1b). Moreover, children were asked about their previous experience with AR. The children were then introduced to the HoloLens 2 and the concept of HMD-AR by showing them the 'Mixed Reality Capture' (livestream) while the experimental supervisor was wearing the device (see Figure 3). We thoroughly instructed the children to handle the device carefully and explained that it is not a toy. Afterwards, the experimenter mounted the device on the child's head and an eye calibration was carried out. As described in Section 1.5, the device is currently designed for adults and the manual states that children under the age of 13 years might not be able to see virtual objects comfortably due to a low interpupillary distance. We therefore asked the children after the eye calibration whether they had any problems in seeing the virtual objects, especially reading texts. Then, the children were informed that they were going to learn different methods of interaction in AR and went through the standardized tutorial on multimodal interaction in HMD-AR that is pre-installed on the HoloLens 2 (see Video S1a). The tutorial includes several interaction scenarios. For our analysis, we focus on the task 'selecting a gemstone' only because it is available for all interaction modes. The task 'selecting a gemstone' is the first shown in the tutorial. The three interaction modes are introduced one after the other and the order of the tutorial tasks is fixed ('tap'—'air-tap'—'voice command'). At the beginning, three gems are shown. They must be selected one after the other with the respective method. During the entire tutorial, the gems can only be selected with the interaction method that is currently being introduced. An invisible speech-based virtual agent explains what to do in each case, and this information is additionally displayed in text form. For 'tap' the translated instruction is: "Tap a nearby gem with your finger to select it." The translated instruction for 'air-tap' is: "Aim the beam from your palm at holograms out of range. Tap to select with your index finger and thumb and release." For the 'voice-command'-interaction, the translated instruction is: "Target a gem with the gaze cursor and say 'Select'". The auditory explanation is played only once, while the text remains visible. If the correct (gesture or voice) input does not follow immediately, help is given depending on the interaction method: For gesture-based interaction, a hand appears that repeats the correct gesture until the gem is successfully selected. In voice-based interaction, the text "say <Select>" appears when a gemstone is targeted with the gaze cursor. However, the tutorial behaves the same way for an incorrect input (e.g., an incorrect gesture or voice command) and there is no feedback reporting that the input is incorrect. Therefore, if the child had a difficulty in understanding the instruction, the experimental supervisor helped by repeating or explaining the instruction given via voice and text. A successful selection is visually indicated by the vanishing of the selected gemstone and a short audio signal. Once all three gemstones are successfully selected, the tutorial automatically proceeds to the next task. To assess the efficiency of the different AR-interaction modes, we asked the children to perform each interaction mode for selecting a gemstone three times. We counted the number of attempts (to calculate the variable 'mean number of attempts') and the time (to calculate the variable 'mean time') for each of the three tries for 'tap', 'air-tap' and 'voice command'. The tutorial performance was recorded with an external camera and with the POV-camera from the HoloLens 2 (see Figure 3) to validate the data for the two variables and to document possible technical issues that may influence the usability. After the tutorial, we asked the children to express their current activity-related achievement emotions with another questionnaire. They had to state their enjoyment, boredom and frustration in comparison to the previous questioning (variables 'enjoyment-post', 'frustration-post', 'boredom-post') (see Document S1b). Pilot studies in which the questionnaires were developed had shown that children were very joyfully excited when they came to the experiment and therefore rated positive emotions as high as possible on the scale and negative emotions as low as possible on the scales. Adjustments were needed to allow the children to express that their positive emotions were even more positive or negative emotions were even less than before interacting with the AR-device. In addition, the children rated the overall system usability

(variable ‘system usability score’) of the HoloLens 2 as an HMD-AR-device. The used System Usability Scale (SUS) [53] comprises ten statements on different facets of system usability. The statements were translated into German and the wording was simplified to match the target group of children (see Appendix B and Document S1c). To assess the children’s preference concerning the interaction modes provided by the device, we showed them schematic pictures of the ‘tap’-, ‘air-tap’- and ‘voice command’-interactions and re-explained the interaction modes to them after completing the tutorial. The children were asked to rank the interaction modes based on their personal preference (variables ‘most favorite interaction mode’ and ‘least favorite interaction mode’) and to provide explanations for their decisions. Finally, we asked the children to report any perceived inconveniences, e.g., pain from wearing the device or problems seeing objects or reading text in AR and to report any inconveniences that are related to simulator sickness [54].

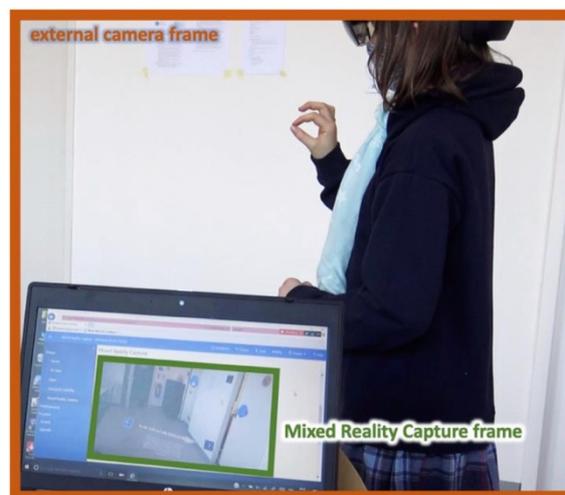


Figure 3. Video recording during the tutorial: An external camera and the ‘Mixed Reality Capture’ accessible through Microsoft Device Portal (via Browser) were used.

2.4. Data Analysis

First, we calculated the SU score. Subsequently, we compared the interaction modes with respect to their efficiency and evaluated the children’s interaction preferences in AR. Lastly, we examined the changes in the activity-related achievement emotions.

2.4.1. Overall Device Usability

The overall system usability was assessed using the variable ‘system usability score’. It is calculated as a descriptive measure from the children’s answers to the SUS-questionnaire. We used a five-point instead of the original ten-point-Likert scale to ease the rating process for the children and adjusted the score calculation accordingly. The scale is acceptably reliable (Cronbach’s Alpha = 0.76) for the sample. In addition, technical issues taken from the recorded tutorial videos that may impact the usability when wearing or using the device are described.

2.4.2. Efficiency of the AR-Interaction Modes

The dependent variables ‘mean number of attempts’ and ‘mean time’ are compared for the three measurement points ‘tap’, ‘air-tap’ and ‘voice command’ using two respective non-parametric Friedman-tests for differences among repeated measures.

2.4.3. Interaction Preference in AR

The quantitative distributions of the children’s most and least favorite interaction mode in AR are reported. Reasons given for their decisions are presented.

2.4.4. Changes in Activity-Related Achievement Emotions

Changes regarding the activity-related achievement emotions were assessed by three Wilcoxon-signed-rank-tests for paired samples comparing the pre and posttest variables ‘enjoyment’, ‘boredom’ and ‘frustration’. Each emotion item of the pretest is based on a five-point Likert-scale (options: ‘totally disagree’—‘rather disagree’—‘neither’—‘rather agree’—‘totally agree’). In the second questionnaire the children rated their current emotions in comparison to the previous measuring point (options: ‘much less’—‘a little less’—‘unchanged’—‘a little more’—‘much more’). Therefore, data transformation was applied. For further details see Appendix A.

3. Results

3.1. Overall Device Usability

The ‘system usability score’ was calculated based on the children’s answers on the five-point Likert-scale with high ratings on regular items increasing the score and high ratings on inverse items decreasing the score following Brooke [53] (see Document S1c). The median system usability score is 80 (maximum: 100) which indicates a ‘good’ system usability [55].

Apart from minor (situational) technical issues, one (that may impact the device usability) occurred frequently: In 19 out of 43 subjects (56%), the AR-objects moved away from the child’s hand as it approached the object. This occurred when the child had to move the body towards an object to reach it, but not when the child stood still when interacting with an object. For a demonstration of the issue see Video S1d. Furthermore, none of the subjects reported any physical inconveniences related to simulator sickness.

3.2. Efficiency of the AR-Interaction Modes

The two non-parametric Friedman-tests of differences among repeated measures (for descriptive statistics see Table 1) revealed significant differences among the three interaction modes ‘tap’, ‘air-tap’ and ‘voice command’ concerning the required number of attempts ($Chi-Square(2) = 72.29, p < 0.001$) and the required time ($Chi-Square(2) = 82.19, p < 0.001$). Pairwise post-hoc comparisons (see Table 2) indicate that the ‘air-tap’-interaction requires more attempts compared to ‘tap’ and ‘voice command’. Concerning the required time, all three interaction modes differ significantly, with ‘tap’ being the fastest and ‘air-tap’ requiring the most time to perform. To conclude, the ‘tap’-interaction appears to be the most efficient for both interaction preferences. The ‘voice command’-interaction appears to be the second-best interaction mode. The ‘air-tap’-interaction is noticeably less efficient to use.

Table 1. Descriptive statistics for the efficiency assessment.

Dependent Variable	Mean (SD)
mean number of attempts for 'tap'	1.001 (0.508)
mean number of attempts for 'air-tap'	2.763 (1.549)
mean number of attempts for 'voice command'	1.194 (0.771)
mean time [s] for 'tap'	1.200 (0.346)
mean time [s] for 'air-tap'	16.047 (13.443)
mean time [s] for 'voice command'	3.672 (6.007)

Table 2. Pairwise Dunn-Bonferroni post-hoc comparisons for the efficiency assessment.

Dependent Variable	Compared Interaction Modes	Z	p (Two-Tailed)	r (Cohen)
mean number of attempts	tap—air-tap	-1.49	<0.001 ***	0.227
	tap—voice command	0.22	0.306	
	air-tap—voice command	1.27	<0.001 ***	0.193
mean time	tap—air-tap	-1.95	<0.001 ***	0.298
	tap—voice command	-1.047	<0.001 ***	0.215
	air-tap—voice command	0.907	<0.001 ***	0.138

Significance levels: *** $p < 0.001$.

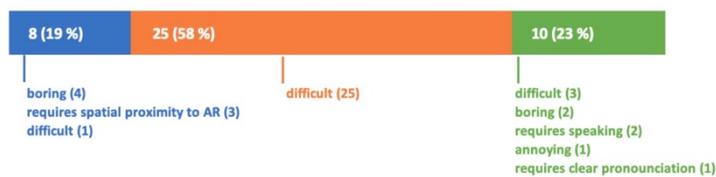
3.3. Interaction Preferences in AR

As shown in Figure 4, most children preferred the 'voice command'-interaction. 'Tap' and 'air-tap' were chosen equally frequent. The most often stated reason for the choice of preference was the simplicity of interaction in AR (for 'tap' and 'voice command'). The children who favored the 'air-tap'-interaction mostly argued that it was fun to use. However, almost 60 percent of the children stated 'air-tap' as their least favorite interaction mode, arguing that it was difficult to use. 'Tap' and 'voice command' were chosen almost equally frequent for various reasons.

Most favorite interaction mode



Least favorite interaction mode



tap air-tap voice command

Figure 4. Distributions for most and least favorite interaction mode in AR with reasons for decisions (N = 43).

3.4. Changes in Activity-Related Achievement Emotions

The Wilcoxon-signed-rank-tests for paired samples (see Table 3) revealed an increase in enjoyment ($Z = -5.641, p < 0.001$), and a decrease in boredom ($Z = -5.031, p < 0.001$) and frustration ($Z = -5.097, p < 0.001$).

Table 3. Descriptive statistics and signs (Wilcoxon-signed-rank-test) for the for the activity emotion change assessment.

Dependent Variable	Mean ¹ (SD)	Pos. Signs	Neg. Signs	Ties
enjoyment-pre	6.350 (0.613)			
enjoyment-post	7.880 (0.981)	36	0	7
boredom-pre	3.370 (0.817)			
boredom-post	2.090 (1.250)	2	30	11
frustration-pre	3.050 (0.213)			
frustration-post	1.840 (1.022)	1	27	15

¹ Range for transformed means: 1(very low)—9(very high).

4. Discussion

To sum up, HoloLens 2 has proven to be an effective and appropriate HMD-AR-device to use with elementary school children, also confirmed by their subjective usability ratings. While children managed to use all provided interaction modes, the newly implemented direct ‘tap’-interaction turned out to be the best performing mode of interaction with virtual elements. Their reported most favorite interaction mode, however, was the ‘voice-command’-interaction. Although children were unfamiliar with HMD-AR-devices, the positive effects on activity-related achievement emotions suggest that educational settings may even benefit from using the HoloLens 2.

4.1. Overall Device Usability

The usability of the device was rated with an average system usability score of 80, resulting in the rating ‘good’ (scores greater than 82 indicate “excellent” usability) [55]. Still, further improvements are required for an effective application of the HoloLens 2 in educational applications because any usability flaw can hamper the learning performance (see Section 1.2). This can be achieved through, e.g., further technical improvements or specific tutorials adapted to the respective application and target group. As AR-technology and AR interactions were largely unknown to the children, it is possible that the extensive instruction required before and during the tutorial could have had a negative impact on the system usability score.

The frequently observed technical issue of AR objects moving away from children could stem from the device settings concerning the relative positioning of AR objects to the viewer, which seem to be designed for adults and their body dimensions. This did not occur in any of the adults that used the device. However, this is a preliminary statement without statistical validation as we did not investigate the occurrence of this issue comparing children with adults. It is assumed that the spatial position of the AR-objects in the tutorial is preset for adults and their physical appearance and that the children need to make a step towards an object to reach it. Yet, this causes the AR-objects to move away from the child as the device registers the spatial movement of the child and tries to maintain the relative position between spectator and AR-object. For a successful use of the device in educational situations with young children, the relative positioning of AR-objects should therefore either be scaled down to the length of children’s arms or absolute object positioning should be selected instead.

The absence of physical inconveniences related to simulator sickness might be explained by the fact that the familiar real world remains visible in AR. Our results are consistent with findings for the HoloLens (first generation) [56], that revealed the device to only cause negligible symptoms of simulator sickness in training. Simulator sickness

has so far been observed more frequently in VR experiences [57], in which the subjects are visually isolated from their reference world.

4.2. Efficiency of the AR-Interaction Modes

As described in Section 3.2, we found the 'tap'-interaction to be most efficient concerning our applied measures (mean task attempts, mean task time) without prior training for the children, as it requires a low number of attempts and can be performed quickly. The 'voice command'-interaction was found to be the second-best interaction mode (low number of attempts, but higher required performance time). The 'air-tap' mode is the least efficient to use, as it requires both a high number of attempts and a long time to perform. Based on our experience during the data collection, this might be since the 'air-tap'-interaction is only registered successfully by the device if the object is selected by the hand beam long enough and if the 'tap' gesture is performed clearly. It is possible that the children's physical and motoric body characteristics [42] additionally complicated the detection of the gesture.

As we found the mean task time to be significantly higher for 'voice command' in comparison to 'tap', which we assume is caused by the longer action processing time of the voice-and-gaze-based interaction. It is necessary for the person to say the command, and for the device to detect and process it, while for the gesture-based interactions, the device can make use of the real-time gesture tracking. In their study with the predecessor model (HoloLens first generation), Munsinger et al. [43] found the 'voice command'-interaction to produce more input errors than the 'air-tap'-interaction. They further found the 'voice command' to require more time to perform than the 'clicker' (which is not available for the HoloLens 2), but not more time than the 'air-tap'-interaction. Our results deviate from these findings as we found the 'voice command'-interaction of the latest HoloLens to be noticeably improved and generally efficient and to not be overall inferior to the best performing interaction mode (i.e., the direct 'tap'-interaction, which was not available on the HoloLens first generation). This improvement was evident even though the children in this study wore medical face masks, which may have limited the clarity of their pronunciation. However, we cannot accurately compare our results concerning the pairwise comparisons between the AR-interaction mode, as we used different study designs (within-subjects design vs. experimental design) and different procedures (focus on the first three attempts with an interaction mode vs. observation after a familiarizing phase).

In our model, we assume that a higher required number of attempts indicates a lower efficiency. However, especially for gesture-based AR-interaction, it could be more efficient to perform several attempts in a short period of time than to only make one attempt. On the other hand, the opposite might be the case for voice-and-gaze-based interaction in AR, based on our experience. Consequently, we did not compute a single efficiency measure from the two measures used in this study, as they could scale in different directions in terms of efficiency. Therefore, the interpretation of the calculated measures regarding the efficiency of the methods must be done cautiously. The efficiency effect of performing several gesture-attempts in a shorter period appeared to be evident for the 'air-tap'-interaction, which is the more complex gesture-based AR-interaction mode in this study. This effect might even be more prominent in more complex gesture-based interactions like the rotation of an object. However, the measure 'mean time' appears to be overall applicable for interpretation concerning efficiency, as a lower completion time means higher efficiency for any AR-interaction mode.

4.3. Interaction Preferences in AR

We found that the children's favorite mode to interact in AR was the 'voice command'. However, 'tap' and 'air-tap' were chosen equally often. We therefore conclude that the preferences concerning AR-interaction vary among the children. For 'tap' and 'voice command', the most given reason for the stated preference was the perceived simplicity of the task. This indicates that the children made their choice based on their personal

experience with the respective AR-interaction modes. Yet, it appears that they did not necessarily make their choice based on the efficiency measures that we applied to compare the AR-interaction modes since the 'voice-command'-interaction was chosen most often. It could be the case that the children who favored the 'voice-command'-interaction found it easier to say the command than to tap at the object, despite performing 'more efficient' with the 'tap'-interaction. The children that favored the 'air-tap'-interaction mostly argued that it was fun to use. It appears that this choice was not made based on efficiency, but rather on personal enjoyment. However, the 'air-tap'-interaction appears to be the least favored in general as almost 60 percent of the children claimed to not like it because of its difficulty to perform. This is consistent with our conclusion that it is the least efficient mean to interact in AR.

4.4. Activity-Related Achievement Emotions

With the aim of evaluating the applicability of the HoloLens 2 for a target group of children in educational settings, we also analyzed the influence of the HMD-AR-device on activity-related achievement emotions. Results are consistent with prior research [31] and indicate a positive effect of the AR-device on enjoyment, which is assumed to promote motivation and interest [32,33]. Although all children used the innovative and technically challenging AR-device for the first time, results showed a decrease in frustration and boredom, being another hint for its motivational effects. While these promising results on emotions point at possible learning benefits for HMD-AR-supported learning environments, it remains unclear whether the effects persist over time as the children become used to the device and the AR-experience. Moreover, it cannot be assumed that positive emotions concerning learning materials or specific devices improve learning outcomes per se [58]. According to the Cognitive Affective Theory of Multimedia Learning (CATML [59]), emotions impact cognitive processes during multimedia learning, as they affect the learners' engagement. The processes involved are complex. It has been demonstrated, for example, that too much positive emotion can impede learning, and that in some cases even negative emotions can be useful [60]. Thus, when devices that trigger strong emotions are used for learning, it is important to carefully examine what effect this has on learning. Therefore, future studies should address affective processes in learning with the HoloLens 2.

4.5. General Limitations of the Study

Due to the necessity to make individual appointments in a laboratory at a university, the sample could have a high proportion of children who are rather interested in AR (or technology in general) as they participated in the study on a voluntary basis and were not invited as a school class. The likely very high proportion of children in the sample with a strong interest in AR could reduce the transferability of the results to the overall population. Therefore, further research with other samples is generally needed to validate or complement the results.

Moreover, the order of the AR-interaction mode presentation in the tutorial was not randomized. The lack of randomization may have produced carry-over effects from the first measuring point ('tap') to the second ('air-tap') and to the third ('voice command'). However, this carry-over could have been diminished by the difference in execution between the presented AR-interaction modes, thus not offering many possibilities to learn something from a task that could be used when performing the next. In an experimental design with split groups for each interaction mode however, we would not have been able to assess the children's personal interaction preference in AR in such semantic proximity to the actual tasks that they experienced as in the within-design that we chose.

Due to the lack of an underlying learning content in the study, the findings cannot be directly transferred into educational situations, and they should be validated or complemented in further studies using multiple activities and learning contents as examples. Nevertheless, the present results can serve as a general basis for the development of any educational HMD-AR application.

Concerning the lack of technical adaption of the device to the physical body characteristics of young children (especially the lower interpupillary distance), we found that although the device was not purposely developed for children, it proved to be usable. In our study, none of the children reported problems seeing virtual objects (neither when asked right after the eye calibration at the start of the study nor after the tutorial when we asked them to report symptoms related to simulator sickness, including problems with text reading or image perception in AR).

4.6. Practical Application

Research findings pointing to the general benefits of AR in educational contexts, and the present study demonstrating that HMD-AR has the potential to be used with younger learners, suggest that in the future, HMD-AR could be profitably used in classrooms. However, from an economic point of view, smart glasses are very expensive devices and if they are purchased in large numbers, e.g., for a complete course, they represent a high financial outlay for schools. In addition, there may be high software development costs, which are necessary because there are still hardly any purchasable software products for curricular-relevant contents. Therefore, schools and other educational institutions are well advised to implement AR in the classroom only if it has been proven that a specific learning content is better conveyed through AR than via traditional or less expensive media and methods. For learning content in which manual interaction with real or virtual objects is not central to learning success, one can also fall back on the more affordable tablet variant.

5. Conclusions

Our study indicates a good system usability of Microsoft's HoloLens 2 when used by elementary school children. The newly implemented direct 'tap'-interaction in AR appears to be most effective without prior training. Despite requiring more time to perform, the 'voice command'-interaction was found to work well with children's voices. This deviates from previous findings for the HoloLens (first generation) and other technologies. Further, we found different interaction preferences in AR among the children in accordance with prior research. Yet, the children's preferences do not seem to be based on objective efficiency. Our study suggests that the HoloLens 2 (as an HMD-AR-device) is generally effective for applications with young children as a target group. However, the provided AR-interaction modes appear to differ in their efficiency, at least during the time of familiarization with the device. We propose that future HMD-AR applications for education offer multiple interaction modes to serve the different interaction preferences in HMD among the children.

Although the research results presented are not based on a specific learning content, they still provide an important point of reference for developers designing HMD-AR based learning applications. However, the particular integration of HMD-AR in educational situations has to be aligned with applied instructional methods and current learning goals. Prior research on HMD-VR-based lessons showed that learning outcomes vary depending on the use of a learning strategy [61]. Nevertheless, the detachment from a learning content allows our findings to be used as a basis to determine general requirements, possibilities, and limitations of the development and implementation of any kind of educational HMD-AR-environments for children. Although our study suggests that the device can be successfully used with elementary school children, a technical adaption concerning the physical body characteristics (e.g., the adaption to lower interpupillary distance) needs to be carried out. Furthermore, more research is needed to verify and complement our findings, as the evaluated device and its associated technologies are still a novelty, with little directly related research available in general. However, due to the continuous technical development of HMD-AR devices, our research only describes the current status and must be revised with the appearance of a successor model or another, better device. Future research in this area could assess the usability of the device in educational settings and compare the usability of the provided AR-interaction modes for actions of higher complexity, e.g., rotating an AR-object or altering its size.

Supplementary Materials: The following will be made available online at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/s21196623/s1>, Video S1a: tutorial demo with selected samples, Document S1b: activity emotion questionnaire, Document S1c: system usability questionnaire, Video S1d: spatial repositioning issue demonstration.

Author Contributions: Conceptualization, L.L., S.M. and K.A.; methodology, L.L.; formal analysis, L.L., M.B., S.M. and K.A.; investigation, L.L. and K.A.; resources, M.P., R.B. and M.P.; data curation, L.L.; writing—original draft preparation, L.L., M.B., K.A. and S.M.; writing—review and editing, S.M., M.P., R.B. and D.S.; visualization, L.L.; supervision, S.M., M.P., R.B. and D.S.; project administration, R.B., M.P. and D.S.; funding acquisition, S.M., R.B., D.S., M.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Bundesministerium für Bildung und Forschung, grant numbers 01JD1811A and 01JD1811C. We acknowledge support by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) and Saarland University within the funding programme Open Access Publishing.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki. The institutional review approval was waived for this study for the following reasons: The participants used a technical device that is approved for private use and performed a preset tutorial. The participants did not have to disclose private personal experiences, sensitive information or attitudes. Participants were not intentionally misinformed or involved in covert observation in a non-public place.

Informed Consent Statement: Written informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are openly available in Open Science Framework (OSF) via: <https://mfr.osf.io/render?url=https%3A%2F%2Fosf.io%2Fdf6w9%2Fdownload> (31 August 2021). For reasons of data protection, the video recordings are not publicly accessible.

Acknowledgments: We would like to thank the anonymous reviewers for their contributions and suggestions to the draft of this paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The presented research is neither sponsored by nor affiliated with Microsoft Corporation. Microsoft Corporation had no role in the design of the study, in the collection, analyses, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Appendix A

The children's activity-related achievement emotions were assessed before and after the tutorial on interaction in HMD-AR using the pre-questionnaire comprises three items adapted for children from Riemer and Schrader [52] (see Figure A1). As explained in Section 2.3, pre-studies for the development of the questionnaires had shown that the children rated positive emotions as high as possible on the scale and negative emotions as low as possible on the questionnaire before and after the tutorial. We therefore modified the post-questionnaire to allow children to express their emotions in relation to the previous questioning (see Figure A2).

As described in Section 2.4.4, data transformation was required for the activity emotion assessment. Both questionnaires are based on a five-point Likert-scale, but the second questionnaire asks the children to rate their sentiments in comparison to the previous questioning. To take this comparison into consideration, we transformed the dataset from the first questionnaire from a range of 1–5 to 3–7, and for the second questionnaire, we either increased or reduced the previous value based on the chosen answer on the items as shown in Table A1.

Table A1. Data transformation for activity-related achievement emotions assessment.

Pre-test item, e.g., 'I am having fun right now.'					
Answer	'Totally disagree'	'Rather disagree'	'Neither'	'Rather agree'	'Totally agree'
Pre-Score X	3	4	5	6	7
Post-test item, e.g., 'How much fun you are having right now in comparison to before?'					
Answer	'Much less'	'A little less'	'Unchanged'	'A little more'	'Much more'
Post-Score Y	X - 2	X - 1	X	X + 1	X + 2

How are you feeling right now? For each statement, please mark what applies best to you!

I am having fun right now.

I think that this is **not true at all.** I think that this is **rather not true.** **Neither.** I cannot decide. I think that this is **rather true.** I think that this is **totally true.**

I am bored right now.

I think that this is **not true at all.** I think that this is **rather not true.** **Neither.** I cannot decide. I think that this is **rather true.** I think that this is **totally true.**

I am annoyed right now.

I think that this is **not true at all.** I think that this is **rather not true.** **Neither.** I cannot decide. I think that this is **rather true.** I think that this is **totally true.**

Figure A1. Pre-questionnaire for activity-related achievement emotions assessment.

How much fun are you having right now compared to before?

Much less fun A bit less fun Just as much fun A bit more fun Much more fun

How bored are you right now compared to before?

Much less bored A bit less bored Just as much bored A bit more bored Much more bored

How annoyed are you right now compared to before?

Much less annoyed A bit less annoyed Just as much annoyed A bit more annoyed Much more annoyed

Figure A2. Post-questionnaire for activity-related achievement emotions assessment.

Appendix B

The questionnaire for the overall device usability assessment described in Section 2.3, consists of the ten items of the System Usability Scale (SUS) [53] (see Figures A3 and A4). The items were translated to German and the wording was simplified.

In the following questions, please rate how well using the glasses worked for you.

I think I would like to use the glasses frequently.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.
I found the glasses to be more complicated than necessary.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.
I think the glasses are easy to use.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.
I think I would need the help of an adult to use the glasses.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.
I think the different features of the glasses worked well together.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

Figure A3. Questionnaire for device usability assessment (page 1).

I think there are too many things that do not go together when using the glasses.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

I think that most children would learn to use the glasses very quickly.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

I found the glasses to be very difficult to use.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

I knew exactly how to use the glasses.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

I had to learn a lot of things before I was able to start using the application on the glasses.				
				
I think that this is not true at all.	I think that this is rather not true.	Neither. I cannot decide.	I think that this is rather true.	I think that this is totally true.

Figure A4. Questionnaire for device usability assessment (page 2).

References

1. Azuma, R.; Baillet, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B. Recent advances in augmented reality. *IEEE Comput. Graph. Appl.* **2001**, *21*, 34–47. [[CrossRef](#)]
2. Cheng, K.-H.; Tsai, C.-C. Affordances of augmented reality in science learning: Suggestions for future research. *J. Sci. Educ. Technol.* **2013**, *22*, 449–462. [[CrossRef](#)]
3. Milgram, P.; Kishino, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Trans. Inf. Syst.* **1994**, *77*, 1321–1329.
4. Akçayır, M.; Akçayır, G. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educ. Res. Rev.* **2017**, *20*, 1–11. [[CrossRef](#)]

5. Garzón, J.; Acevedo, J. Meta-analysis of the impact of augmented reality on students' learning gains. *Educ. Res. Rev.* **2019**, *27*, 244–260. [[CrossRef](#)]
6. Garzón, J.; Kinshuk; Baldiris, S.; Gutiérrez, J.; Pavón, J. How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educ. Res. Rev.* **2020**, *31*, 100334. [[CrossRef](#)]
7. Ozdemir, M.; Sahin, C.; Arcagok, S.; Demir, M.K. The effect of augmented reality applications in the learning process: A meta-analysis study. *Eurasian J. Educ. Res.* **2018**, *18*, 165–186. [[CrossRef](#)]
8. Ibáñez, M.-B.; Delgado-Kloos, C. Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Comput. Educ.* **2018**, *123*, 109–123. [[CrossRef](#)]
9. Lara, O.D.; Labrador, M.A. A survey on human activity recognition using wearable sensors. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2013**, *15*, 1192–1209. [[CrossRef](#)]
10. Vrigkas, M.; Nikou, C.; Kakadiaris, I.A. A review of human activity recognition methods. *Front. Robot. AI* **2015**, *2*, 28. [[CrossRef](#)]
11. Santos, M.E.C.; Chen, A.; Taketomi, T.; Yamamoto, G.; Miyazaki, J.; Kato, H. Augmented reality learning experiences: Survey of prototype design and evaluation. *IEEE Trans. Learn. Technol.* **2014**, *7*, 38–56. [[CrossRef](#)]
12. Mayer, R. *Multimedia Learning*, 2nd ed.; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2009.
13. Strzys, M.P.; Thees, M.; Kapp, S.; Kuhn, J. Smartglasses in STEM laboratory courses—The augmented thermal flux experiment. In Proceedings of the Physics Education Research Conference 2018, Washington, DC, USA, 1–2 August 2018. [[CrossRef](#)]
14. Thees, M.; Kapp, S.; Strzys, M.P.; Beil, F.; Lukowicz, P.; Kuhn, J. Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Comput. Hum. Behav.* **2020**, *108*, 106316. [[CrossRef](#)]
15. Altmeyer, K.; Kapp, S.; Thees, M.; Malone, S.; Kuhn, J.; Brünken, R. The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *Br. J. Educ. Technol.* **2020**, *51*, 611–628. [[CrossRef](#)]
16. Szajna, A.; Stryjski, R.; Woźniak, W.; Chamier-Gliszczyński, N.; Kostrzewski, M. Assessment of augmented reality in manual wiring production process with use of mobile AR glasses. *Sensors* **2020**, *20*, 4755. [[CrossRef](#)]
17. Ainsworth, S. DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learn. Instr.* **2006**, *16*, 183–198. [[CrossRef](#)]
18. Evans, G.; Miller, J.; Iglesias Pena, M.; MacAllister, A.; Winer, E. Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. In Proceedings of the SPIE Defense + Security 2017, Anaheim, CA, USA, 9–13 April 2017; p. 101970V. [[CrossRef](#)]
19. Kapp, S.; Thees, M.; Beil, F.; Weatherby, T.; Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. A comparative study in an undergraduate physics laboratory course. In Proceedings of the CSEDU 2020: 12th International Conference on Computer Supported Education, Prague, Czech Republic, 2–4 May 2020; Volume 2, pp. 197–206. [[CrossRef](#)]
20. Wilson, M. Six views of embodied cognition. *Psychon. Bull. Rev.* **2002**, *9*, 625–636. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. Korbach, A.; Ginns, P.; Brünken, R.; Park, B. Should learners use their hands for learning? Results from an eye-tracking study. *J. Comput. Assist. Learn.* **2020**, *36*, 102–113. [[CrossRef](#)]
22. Bujak, K.R.; Radu, I.; Catrambone, R.; MacIntyre, B.; Zheng, R.; Golubski, G. A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom. *Comput. Educ.* **2013**, *68*, 536–544. [[CrossRef](#)]
23. Yuen, S.C.-Y.; Yaouneyong, G.; Johnson, E. Augmented reality: An overview and five directions for AR in education. *J. Educ. Technol. Dev. Exch. JETDE* **2011**, *4*, 119–140. [[CrossRef](#)]
24. Majeed, Z.H.; Ali, H.A. A review of augmented reality in educational applications. *Int. J. Adv. Technol. Eng. Explor.* **2020**, *7*, 20–27. [[CrossRef](#)]
25. Dede, C. Immersive interfaces for engagement and learning. *Science* **2009**, *323*, 66–69. [[CrossRef](#)]
26. Wu, H.-K.; Lee, S.W.-Y.; Chang, H.-Y.; Liang, J.-C. Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Comput. Educ.* **2013**, *62*, 41–49. [[CrossRef](#)]
27. Anderson, C.L.; Anderson, K.M. Wearable technology: Meeting the needs of individuals with disabilities and its applications to education. In *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL)*; Buchem, I., Klamma, R., Wild, F., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 59–77.
28. Barz, M.; Kapp, S.; Kuhn, J.; Sonntag, D. Automatic recognition and augmentation of attended objects in real-time using eye tracking and a head-mounted display. In Proceedings of the ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications, Virtual Event, Germany, 25–27 May 2021; pp. 1–4. [[CrossRef](#)]
29. Arici, F.; Yildirim, P.; Caliklar, Ş.; Yilmaz, R.M. Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis. *Comput. Educ.* **2019**, *142*, 103647. [[CrossRef](#)]
30. Kuhn, J.; Lukowicz, P.; Hirth, M.; Weppner, J. GPhysics—Using google glass as experimental tool for wearable-technology enhanced learning in physics. In Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Environments, Prague, Czech Republic, 15–17 July 2015; pp. 212–219. [[CrossRef](#)]
31. Zhang, H.; Cui, Y.; Shan, H.; Qu, Z.; Zhang, W.; Tu, L.; Wang, Y. Hotspots and trends of virtual reality, augmented reality and mixed reality in education field. In Proceedings of the 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (ILRN 2020), San Luis Obispo, CA, USA, 21–25 June 2020; pp. 215–219. [[CrossRef](#)]
32. Pekrun, R. The control-value theory of achievement emotions: Assumptions, corollaries, and implications for educational research and practice. *Educ. Psychol. Rev.* **2006**, *18*, 315–341. [[CrossRef](#)]

33. Pekrun, R.; Goetz, T.; Frenzel, A.C.; Barchfeld, P.; Perry, R.P. Measuring emotions in students' learning and performance: The achievement emotions questionnaire (AEQ). *Contemp. Educ. Psychol.* **2011**, *36*, 36–48. [CrossRef]
34. Munoz-Cristobal, J.A.; Jorriñ-Abellan, I.M.; Asensio-Perez, J.I.; Martinez-Mones, A.; Prieto, L.P.; Dimitriadis, Y. Supporting teacher orchestration in ubiquitous learning environments: A study in primary education. *IEEE Trans. Learn. Technol.* **2015**, *8*, 83–97. [CrossRef]
35. Squire, K.D.; Jan, M. Mad city mystery: Developing scientific argumentation skills with a place-based augmented reality game on handheld computers. *J. Sci. Educ. Technol.* **2007**, *16*, 5–29. [CrossRef]
36. Ibanez, M.-B.; de Castro, A.J.; Delgado Kloos, C. An empirical study of the use of an augmented reality simulator in a face-to-face physics course. In Proceedings of the 2017 IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Timisoara, Romania, 3–7 July 2017; pp. 469–471. [CrossRef]
37. Radu, I. Augmented reality in education: A meta-review and cross-media analysis. *Pers. Ubiquitous Comput.* **2014**, *18*, 1533–1543. [CrossRef]
38. Nielsen, J. *Usability Engineering*; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1993.
39. Bourges-Waldegg, P.; Moreno, L.; Rojano, T. The role of usability on the implementation and evaluation of educational technology. In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, 4–7 January 2000; Volume 1, p. 7. [CrossRef]
40. Papakostas, C.; Troussas, C.; Krouska, A.; Sgouroupoulou, C. Measuring user experience, usability and interactivity of a personalized mobile augmented reality training system. *Sensors* **2021**, *21*, 3888. [CrossRef] [PubMed]
41. Chang, Y.-L.; Hou, H.-T.; Pan, C.-Y.; Sung, Y.-T.; Chang, K.-E. Apply an augmented reality in a mobile guidance to increase sense of place for heritage places. *J. Educ. Technol. Soc.* **2015**, *18*, 166–178.
42. Radu, I.; MacIntyre, B. Using children's developmental psychology to guide augmented-reality design and usability. In Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Atlanta, GA, USA, 5–8 November 2012; pp. 227–236. [CrossRef]
43. Munsinger, B.; White, G.; Quarles, J. The usability of the Microsoft HoloLens for an augmented reality game to teach elementary school children. In Proceedings of the 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games), Vienna, Austria, 4–6 September 2019; pp. 1–4. [CrossRef]
44. Kennedy, J.; Lemaignan, S.; Montassier, C.; Lavalade, P.; Irfan, B.; Papadopoulos, F.; Senft, E.; Belpaeme, T. Child speech recognition in human-robot interaction: Evaluations and recommendations. In Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Vienna, Austria, 6 March 2017; pp. 82–90. [CrossRef]
45. Oviatt, S.; Cohen, P.R. The paradigm shift to multimodality in contemporary computer interfaces. *Synth. Lect. Hum.-Cent. Inform.* **2015**, *8*, 1–243. [CrossRef]
46. Jameson, A.; Kristensson, P.O. Understanding and supporting modality choices. In *The Handbook of Multimodal-Multisensor Interfaces: Foundations, User Modeling, and Common Modality Combinations*; Oviatt, S., Schuller, B., Cohen, P.R., Sonntag, D., Potamianos, G., Krüger, A., Eds.; Association for Computing Machinery (ACM): New York, NY, USA, 2017; Volume 1, pp. 201–238. [CrossRef]
47. Oviatt, S.; Schuller, B.; Cohen, P.R.; Sonntag, D.; Potamianos, G.; Krüger, A. Introduction: Scope, trends, and paradigm shift in the field of computer interfaces. In *The Handbook of Multimodal-Multisensor Interfaces: Foundations, User Modeling, and Common Modality Combinations*; Oviatt, S., Schuller, B., Cohen, P.R., Sonntag, D., Potamianos, G., Krüger, A., Eds.; Association for Computing Machinery (ACM): New York, NY, USA, 2017; pp. 1–15. [CrossRef]
48. Southgate, E.; Smith, S.P.; Scevak, J. Asking ethical questions in research using immersive virtual and augmented reality technologies with children and youth. In Proceedings of the 2017 IEEE Virtual Reality (VR), Los Angeles, CA, USA, 18–22 March 2017; pp. 12–18. [CrossRef]
49. Steele, P.; Burleigh, C.; Kroposki, M.; Magabo, M.; Bailey, L. Ethical considerations in designing virtual and augmented reality products—Virtual and augmented reality design with students in mind: Designers' perceptions. *J. Educ. Technol. Syst.* **2020**, *49*, 219–238. [CrossRef]
50. Slater, M.; Gonzalez-Liencre, C.; Haggard, P.; Vinkers, C.; Gregory-Clarke, R.; Jelley, S.; Watson, Z.; Breen, G.; Schwarz, R.; Steptoe, W.; et al. The ethics of realism in virtual and augmented reality. *Front. Virtual Real.* **2020**, *1*, 1. [CrossRef]
51. Product Safety Warnings and Instructions. Available online: <https://support.microsoft.com/en-us/topic/product-safety-warnings-and-instructions-726eab87-f471-4ad8-48e5-9c25f68927ba> (accessed on 22 September 2021).
52. Riemer, V.; Schrader, C. Mental model development in multimedia learning: Interrelated effects of emotions and self-monitoring. *Front. Psychol.* **2019**, *10*, 899. [CrossRef]
53. Brooke, J. SUS: A "quick and dirty" usability scale. In *Usability Evaluation in Industry*; Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A., McClelland, L., Eds.; Taylor & Francis: London, UK, 1996; pp. 189–194.
54. Bruck, S.; Watters, P.A. Estimating cybersickness of simulated motion using the simulator sickness questionnaire (SSQ): A controlled study. In Proceedings of the 2009 Sixth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, Tianjin, China, 11–14 August 2009; pp. 486–488. [CrossRef]
55. Bangor, A.; Kortum, P.; Miller, J. Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *J. Usability Stud.* **2009**, *4*, 114–123.

56. Vovk, A.; Wild, F.; Guest, W.; Kuula, T. Simulator sickness in augmented reality training using the Microsoft HoloLens. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montreal, QC, Canada, 21 April 2018; pp. 1–9. [[CrossRef](#)]
57. Serio, Á.D.; Ibáñez, M.B.; Kloos, C.D. Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course. *Comput. Educ.* **2013**, *68*, 586–596. [[CrossRef](#)]
58. Sung, E.; Mayer, R.E. When graphics improve liking but not learning from online lessons. *Comput. Hum. Behav.* **2012**, *28*, 1618–1625. [[CrossRef](#)]
59. Moreno, R.; Mayer, R. Interactive multimodal learning environments. *Educ. Psychol. Rev.* **2007**, *19*, 309–326. [[CrossRef](#)]
60. Knörzer, L.; Brünken, R.; Park, B. Emotions and multimedia learning: The moderating role of learner characteristics: Emotions in multimedia learning. *J. Comput. Assist. Learn.* **2016**, *32*, 618–631. [[CrossRef](#)]
61. Parong, J.; Mayer, R.E. Learning science in immersive virtual reality. *J. Educ. Psychol.* **2018**, *110*, 785–797. [[CrossRef](#)]

2.3 Pädagogisch-didaktische Möglichkeiten und Grenzen von AR-Technologien für den Einsatz mit Grundschulkindern

2.3.1 Pedagogical Usability als Konstrukt zur Beurteilung des pädagogisch-didaktischen Potenzials medial gestützter Lehr-Lern-Tools

In Kapitel 1.2 wurde das „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002, fortan bezeichnet als Usefulness-Modell) vorgestellt. Nun werden ergänzend verschiedene Uneindeutigkeiten bzgl. der Begriffe „Pedagogical Usability“ und „Added Value“ in dem Modell erläutert.

In der Literatur wird unter Pedagogical Usability (PU) verstanden, inwieweit Lehr-Lern-Tools insgesamt oder spezifische Aspekte von Lehr-Lern-Tools wie das Interface oder die gezeigten Inhalte die Lernenden oder den Lehr-Lern-Prozess unterstützen (Silius & Tervakari 2002). Inhaltlich wird die PU meist anhand ihrer Dimensionen definiert (vgl. z. B. Nokelainen 2005; 2006; Sales Junior et al. 2016). Zur inhaltlichen Konkretion der PU werden daher die von Nokelainen (2005) formulierten zehn Dimensionen herangezogen (s. Seite 3 der Publikation 7). Beim Abgleich dieser Dimensionen mit dem Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments in der von Silius & Tervakari (2002) überarbeiteten Version fällt auf, dass in diesem Modell der „Value Added“ ein Unteraspekt der Utility darstellt (vgl. Kapitel 1.2), während der „Added Value“ eine Dimension der PU nach Nokelainen (2005) ist. Ein inhaltlicher Vergleich der jeweils zugrundeliegenden Publikationen zeigt, dass die Beschreibungen des „Value Added“ bei Silius & Tervakari (2002) und des „Added Value“ bei Nokelainen (2005) weitgehend übereinstimmen. Dies wirft die Vermutung auf, dass beide Auslegungen bzw. Verortungen eines „Mehrwert“-Aspekts unabhängig voneinander geschehen sind. Hierfür spricht auch der Bezug von Nokelainen (2005) auf eine frühere Version des Model of Usefulness of-Web-Based Learning Environments (vgl. Abb. 11) ohne Referenz auf die von Silius & Tervakari (2002) vorgeschlagene Version des Modells.

Während – wie zu Beginn dieses Absatzes beschreiben – im Rahmen der Publikation 7 der „Added Value“ im Verständnis von Nokelainen (2005) als eine der zehn Dimensionen der PU aufgefasst wird, wird im Fazit dieser Arbeit (vgl. Kapitel 3) diskutiert, inwieweit eine „Trennung“ eines (ökonomischen) Mehrwerts von der (generellen) Betrachtung einer PU gemäß der Modellierung von Silius & Tervakari (2002) insbesondere bei der Konstruktion von Utopien – also ggf. zukünftig technisch realisierbaren und praktikablen, hypothetischen digital gestützten Tools – sinnvoll sein könnte.

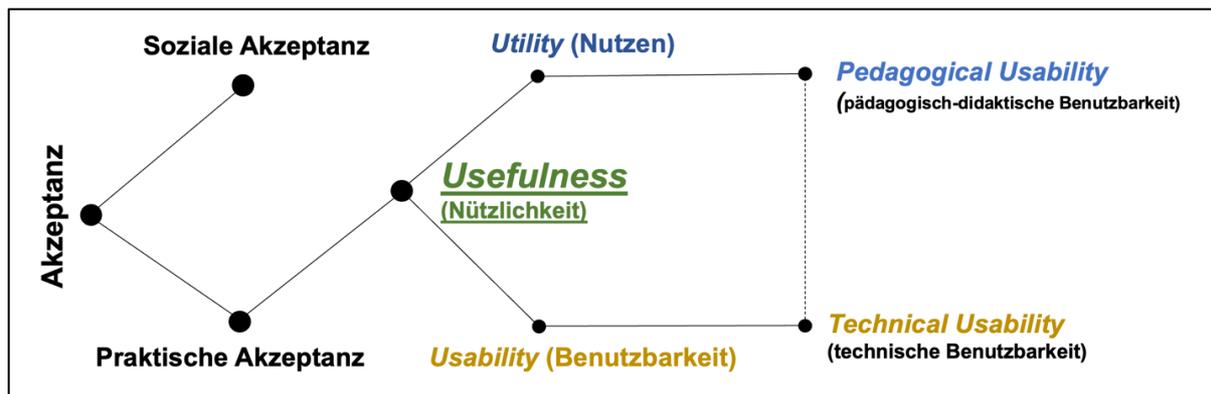


Abbildung 11: Verortung von Technical Usability und Pedagogical Usability in Nielsens Modellierung „The various parameters associated with system acceptability“ (Nielsen 1990: 148) bzw. „A model of the attributes of system acceptability“ (Nielsen 1993: 25). Adaptierte Darstellung nach Nokelainen (2006: 180) mit eigenen Übersetzungen.

Eine inhaltliche Analyse der zehn Dimensionen der PU (Nokelainen 2005; 2006; Sales Junior et al. 2016) diene im Rahmen der Publikation 7 zur Problematisierung des Begriffs „Pedagogical“ angesichts einiger Dimensionen der PU, die im Verständnis einer didaktischen Rekonstruktion (Duit et al. 2012; Kattmann et al. 1997) zumindest in Teilen eher der Didaktik als der Pädagogik zuzuordnen sind (z. B. eine Dimension der PU, die das Vorwissen der Lernenden fokussiert). Dementsprechend ergibt sich die Frage, inwieweit der Begriff „Pedagogical-Didactical Usability“ passender wäre oder inwieweit das übergeordnete Usefulness-Modell überarbeitet werden müsste, um die explizite Adressierung didaktischer Aspekte auszuweisen (vgl. auch Fazit, Kapitel 3). Lauer, Peschel und Irion (Lauer et al. 2024 i. V.) diskutieren diese Notwendigkeit zur Ausschärfung des Begriffs „Pedagogical Usability“ bzw. die Notwendigkeit zur Überarbeitung des Usefulness-Modells im Detail.

In der Publikation 7 werden zunächst technische Unterschiede und vermutete Unterschiede in der Wirkung in Lehr-Lern-Situationen zwischen Brillen-AR und Tablet-AR (vgl. Kapitel 1.3.3) am Beispiel des zuvor beschriebenen AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe (vgl. Kapitel 2.1.2) beschrieben. Anschließend wird die Pedagogical Usability (Nokelainen 2005), verortet im Usefulness-Modell, als Konstrukt zur Beurteilung des pädagogisch-didaktischen Potenzials medial gestützter Lehr-Lern-Tools diskutiert. Zuletzt wird aus diesen Darstellungen eine Studie skizziert, deren Ziel der Vergleich der AR-Brillen-Version mit der AR-Tablet-Version des Tools zum Erlernen von Schaltsymboliken für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe (vgl. Kapitel 2.1.2) ist. Diese skizzierte Studie findet sich als Teilstudie in der Publikation 8 (s. Kapitel 2.3.2).

Publikation 7: Inwiefern eignen sich Augmented Reality-Technologien für den Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe?

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹

Art der Publikation: Konzeptioneller theoretischer Beitrag in einer Fachzeitschrift

Reviewprozess: Einreichung – Überarbeitung – Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 29.09.2021

Angenommen: 21.01.2022

Publiziert: 01.03.2022

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel, GDSU-Journal
Herausgeber*innen (Bestätigung durch Prof. Dr. T. Goll)

Erschienen in: *GDSU-Journal*, 13, 94–96

Copyright: © 2022, GDSU - INFO

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts, Gestaltung des integrierten Posters, Haupt-Planung der skizzierten Studie

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

Inwiefern eignen sich Augmented Reality-Technologien für den Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe?

Luisa Lauer und Markus Peschel

The evaluation of digital technologies concerning their benefit for teaching and learning is essential to enable a fruitful usage in the classroom. The present paper discusses the pedagogical usability of different visualization technologies of augmented reality (AR) in primary science education. Subsequently, the design for a qualitative study concerning the assessment of primary school teacher's opinions concerning the pedagogical usability of AR is derived. The study aims to obtain findings concerning differences in pedagogical usability between two AR-visualization technologies is derived using the example of an educational AR application for primary science-studies.

1. Theoretischer Hintergrund

Aufgrund der zunehmenden Durchdringung der Lebenswelt mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) (GDSU 2021), z.B. durch smarte Geräte oder soziale Netzwerke ist es von Interesse, die Wirkungen und Effekte des fachdidaktischen Einsatzes von IKT in Lehr-Lernsituationen (insb. des Sachunterrichts wegen seines Lebensweltbezugs) – auch für zukunftsorientierte Szenarien – zu untersuchen (Gervé 2016). Das BMBF-Projekt GeAR, Teilprojekt Primarstufe (Förderkennzeichen 01JD1811A) beschäftigt sich mit der (zunächst monoperspektivisch ausgerichteten) Erforschung des Einsatzes der digitalen Technik *Augmented Reality* (AR) in Lehr-Lernsituationen zur Vermittlung des Themas elektrische Schaltskizzen des naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterrichts.

AR ermöglicht die Echtzeit-Anreicherung des Blickfeldes mit digitalen Informationen und kann mittels verschiedener Technologien (Azuma, Baillot, Behringer, Feiner, Julier & MacIntyre 2001), wie halbtransparenten Brillen (Smartglasses) oder der Kamerasicht im Display auf smarten Geräten (Tablets, Phones) realisiert werden. Diese beiden Technologien unterscheiden sich sowohl in Bezug auf ihren Grad der Immersion (empfundenes Eintauchen in die AR), als auch bezüglich der darauf aufbauenden wahrgenommenen Repräsentationen (Ainsworth 2006) von Objekten: Smartglasses reichern die unmittelbar wahrnehmbare reale Umgebung mit virtuellen Objekten an, während bei Display-basierten Geräten lediglich ein digital repliziertes Abbild der Realität in der Kamerasicht augmentiert wird. Daher werden Unterschiede bzgl. der Wirkung bzw. der technischen und pädagogisch-didaktischen „Benutzbarkeit“ der Technologien in Lehr-Lernsituationen erwartet. Die pädagogisch-didaktischen Aspekte dieser Benutzbarkeit werden im „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993, 25) unter dem Begriff der „Pedagogical Usability“ (a.a.O., 25) zusammengefasst. Die Pedagogical Usability beschreibt die „Benutzbarkeit“ einer digital gestützten Lehr-Lernanwendung bzgl. der Unterstützung bei der Erreichung pädagogischer (aber auch didaktischer) Ziele in Lehr-Lernsituationen. Daher befasst sich die in diesem Beitrag dargestellte Studie mit der Fragestellung „Welche Unterschiede sehen Lehrkräfte in der Pedagogical Usability beim direkten Vergleich zwischen einer AR-Smartglasses-Anwendung und einer AR-Tablet-Anwendung zur Echtzeit-Visualisierung von Schaltskizzen?“

GDSU-Journal März 2022, Heft 13

2. Skizzierung der Studie

Für die Studie werden Lehrkräfte zu ihrer Einschätzung der Unterschiede zwischen der Pedagogical Usability von Smartglasses und Tablets am Beispiel einer AR-gestützten Lehr-Lernumgebung zum Thema elektrische Schaltskizzen befragt. Die Befragung findet nach einer Demonstrations- und Ausprobierphase mit beiden Varianten der Lehr-Lernumgebung in Form von leitfadengestützten Interviews (Loosen 2014) statt, welches sich an den Dimensionen der Pedagogical Usability orientiert und die Daten werden mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring & Fenzl 2019) ausgewertet.

Literatur

- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001): Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21, Nr. 6, 34-47.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts [GDSU] (2021): Sachunterricht und Digitalisierung. https://gdsu.de/sites/default/files/PDF/GDSU_2021_Positionspapier_Sachunterricht_und_Digitalisierung_deutsch_de.pdf [15.09.2021].
- Loosen, W. (2014): Das Leitfadeninterview – eine unterschätzte Methode. In: Averbek-Lietz, S. & Meyen, M. (Hrsg.): *Handbuch nicht standardisierte Methoden in der Kommunikationswissenschaft*. Wiesbaden, S. 1-15.
- Mayring P. & Fenzl T. (2019): Qualitative Inhaltsanalyse. In: Baur N. & Blasius J. (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden, S. 633-648.
- Nielsen, J. (2006): *Usability Engineering*. In: J. Byrne (Hrsg.), *Technical Translation*. San Diego, S. 151-176.
- Nielsen, J. (1993): *Usability Engineering*. San Diego.



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Inwiefern eignen sich Augmented Reality- Technologien für den Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe?

Luisa Lauer & Markus Peschel



Aufgrund der zunehmenden Durchdringung der Lebenswelt mit ICT/KT (GDSU, 2021) ist es von Interesse, die Wirkungen und Effekte des fachdidaktischen Einsatzes von IKT in Lehr-Lernsituationen zu untersuchen. Im Rahmen dieses Beitrags wird die „Benutzbarkeit“ verschiedener Visualisierungstechnologien von Augmented Reality (AR) in Lehr-Lernsituationen diskutiert. Daraus wird das Design für eine qualitative Studie zur Erforschung dieser Benutzbarkeit anhand der „Pedagogical Usability“ am Beispiel einer AR-Lehr-Lernanwendung für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht abgeleitet.

Augmented Reality-Technologien eröffnen neue pädagogisch-didaktische Gestaltungsmöglichkeiten

Augmented Reality: Erweiterung der Wahrnehmung durch digitale Inhalte (Azuma, 2001) → **Räumliche und semantische Echtzeit-Verknüpfung realer und virtueller Objekte**

Forschungsstand:

- Augmented Reality kann den Erwerb von Wissen und Fertigkeiten unterstützen, bringt aber auch technische Einsatzschwierigkeiten mit sich
- Mittels AR können Zusatzinformationen in Echtzeit eingeblendet/ eingespielt werden, auch Interaktion mit Objekten in AR ist möglich

AR-Technologien:

- Display-basierte AR: Virtuelle Informationen werden in der Kamerasicht eines Endgeräts angezeigt, welches in der Hand gehalten wird (Bild links)
- Smartglasses-AR: Virtuelle Informationen werden über eine auf dem Kopf getragene Brille scheinbar direkt ins Sichtfeld integriert (Bild rechts)

„Look-On“-AR

Meist verwendete Technologie für AR-Anwendungen im Bildungsbereich
Virtuelle Objekte im digitalen Abbild der Realität
Realisierbar mit bekannten Geräten
Geräte müssen in der Hand gehalten oder festgemacht werden



Display-basierte (links) und Smartglasses-AR-Anwendung (rechts) zur Echtzeit-Visualisierung von Schaltsymbolen für die Primarstufe

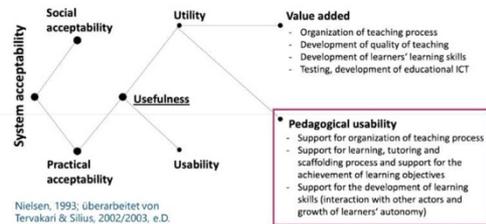
„See-Through“-AR

Kaum verwendete Technologie für AR-Anwendungen im Bildungsbereich
Virtuelle Objekte unmittelbar in der realen Umgebung
Realisierbar nur mit speziellen Brillen
Hände sind frei, kein Gerät als „Mittlermedium“ zwischen Realität und Virtualität notwendig

↳ **Worin unterscheiden sich diese Technologien hinsichtlich ihrer „Benutzbarkeit“ für pädagogisch-didaktische Zwecke?** ↳

„Benutzbarkeit“ digital gestützter Lehr-Lernanwendungen: Pedagogical Usability

Pedagogical Usability: Oberbegriff für verschiedene **pädagogische** (und didaktische) Aspekte der Benutzbarkeit digitaler Lehr-Lernanwendungen, hinsichtlich derer sich z.B. verschiedene AR-Technologien unterscheiden können.



Nielsen, 1993; überarbeitet von Tervakari & Sillus, 2002/2003, e.D.

Value added

- Organization of teaching process
- Development of quality of teaching
- Development of learners' learning skills
- Testing, development of educational ICT

Pedagogical usability

- Support for organization of teaching process
- Support for learning, tutoring and scaffolding process and support for the achievement of learning objectives
- Support for the development of learning skills (interaction with other actors and growth of learners' autonomy)

Dimensionen (Sales Junior et al., 2016)

1. Student Control
2. Student Activity
3. Cooperative/Collaborative Learning
4. Guidance to Purposes
5. Applicability
6. Value added
7. Motivation
8. Value of Previous Knowledge
9. Flexibility
10. Feedback

Studie: Unterschiede in der Pedagogical Usability von AR-Tablets und AR-Smartglasses

Fragestellung: Welche Unterschiede sehen Lehrkräfte in der Pedagogical Usability beim direkten Vergleich zwischen einer AR-Smartglasses-Anwendung und einer AR-Tablet-Anwendung zur Echtzeit-Visualisierung von Schaltskizzen?

Design: Qualitative Studie im within-Subjects Design, Lehrkräfte werden einzeln eingeladen und probieren beide AR-Varianten aus (in zufälliger Reihenfolge)

Instrument: Leitfadengestütztes Interview zum Vergleich der beiden AR-Varianten bzgl. der zehn Dimensionen der Pedagogical Usability, Aufzeichnung der Interviews

Datenanalyse: Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2019), Hauptkategorien: Dimensionen der Pedagogical Usability, Unterkategorienbildung am Material

Ergebnisse: Erhebungszeitraum: Juni-Juli 2021, Auswertung erfolgt im Herbst/Winter 2021



Literatur

Araújo, R., Martins, P., Galvão, S., Vilas, B.M.: (2019) Research Trends in the Use of Augmented Reality in Science Education: Content and Bibliometric Mapping Analysis. Computers & Education 142, 103647. Azuma, R., Baillet, Y., Bohringer, R., Felton, S., Juller, S., & MacIntyre, B.: (2001) Recent advances in augmented reality. IEEE Computer Graphics and Applications, 23(6), 34-47. **Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts** (2021) Sachunterricht und Digitalisierung - Lauer, L., Peschel, M., Molino, S., Altmeyer, K., Brinken, R., Javaher, N., Amrathovic, D., Gruner, A., & Lühmann, P. (2020). Real-time visualization of electrical circuit schematics: An augmented reality assessment setup to foster metacognitive knowledge in introductory physics education. The Physics Teacher 58(7), 518-519. Nielsen, J. (1993). Usability Engineering. Academic Press. Peschel, M. (2020). Weiterentwicklung als sachunterrichtliches Lernen mit und über digitale Medien - Lernen mit und über digitale Medien als Ausprägung einer umfassenden Sachbildung. In M. Thurner, B. Krammel, & T. Kropf (Hrsg.), Digital Bildung im Grundschulalter - Grundlagen zum Konzept der Pädagogischen (S. 341-355). Springer. Sales Junior, F. M., Ramos, M. A. S., Pinho, A. L. S., & Santa Rosa, J. G. (2016). Pedagogical Usability: A theoretical essay for e-learning. MOJOS, 32(1), 7-15.

anschaue.von



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

luisa.lauer@uni-saarland.de

markus.peschel@uni-saarland.de

www.gear-lab.de

2.3.2 Beurteilung der Pedagogical Usability des AR-Lehr-Lern-Tools zum Erlernen von Schaltsymboliken durch Grundschullehrkräfte

Verortung in Bezug auf das Thema der Dissertation

Wie am Ende von Kapitel 1 (vgl. Zwischenfazit 2) gezeigt wurde, besteht insbesondere im Sachunterricht der Primarstufe noch ein großes Desiderat bzgl. der Erforschung des pädagogisch-didaktischen Potenzials des Einsatzes von AR. Da das in Kapitel 2.1.2 dargestellte AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken in der dort vorgestellten Form aufgrund seiner prototypischen technischen Bauweise noch nicht (verlässlich) in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden konnte, sollte eine weitere Optimierungsstufe bestehende technische Problematiken beseitigen und gleichzeitig die Benutzbarkeit für pädagogisch-didaktische Zwecke verbessern. Um die Benutzbarkeit des AR-Lehr-Lern-Tools für pädagogisch-didaktische Zwecke zu erfassen und entsprechende Verbesserungen zu eruieren (sowohl in der Brillen-AR-Variante als auch in der Tablet-AR-Variante) sollte das Tool von praktizierenden Grundschullehrkräften im Rahmen einer Studie getestet und evaluiert werden, denn letztlich stellt die Lehrperson den Schlüsselfaktor für jegliche pädagogisch-didaktische Intervention im Unterricht dar (vgl. z. B. Angebots-Nutzungs-Modell der Wirkungsweise von Unterricht, Helmke 2015).

Als Konstrukt zur Erfassung der pädagogisch-didaktischen Benutzbarkeit wurde die Pedagogical Usability (PU) unter Berufung auf die zehn von Nokelainen (2005) formulierten Dimensionen der PU verwendet (vgl. Ausführungen des vorherigen Kapitels 2.3.1).

Die Publikation 8 adressiert insgesamt drei Forschungsfokusse in Bezug auf die Beurteilung der PU des in Kapitel 2.1.2 vorgestellten AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken durch Grundschullehrkräfte:

1. PU des **aktuellen Stands** des AR-Lehr-Lern-Tools
2. **Zu verbessernde Aspekte** zur Steigerung der PU des AR-Lehr-Lern-Tools
3. **Unterschiede** zwischen der Brillen-AR-Variante und der Tablet-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. der PU

Methodologische und methodische Erläuterungen

Studiendesign und Stichprobe: Für die Studie wurde ein **qualitatives Design** gewählt, da die individuellen Sichtweisen von Grundschullehrkräften erfasst und beschrieben bzw. interpretiert werden (vgl. Aepli et al. 2016: 112, 115, 130 f). Aufgrund der geringen Zahl an bisherigen Forschungen bzw. Befunden zur Pedagogical Usability von AR im Sachunterricht wurde eine **explorative** Adressierung der zuvor beschriebenen Forschungsfokusse angestrebt

(vgl. Pospeschill 2013: 61). Da die Datenerhebung in persönlicher Auseinandersetzung mit den Teilnehmenden gewonnen wurde, ist das Design außerdem als **interaktiv** zu bezeichnen (vgl. Aeppli et al. 2016: 135; McMillan & Schumacher 2006). Für die Stichprobe wurden (angehende) Grundschullehrkräfte jeden Alters zugelassen. Da insbesondere die Erfassung der persönlichen und möglichst unbeeinflussten Einschätzungen von Grundschullehrkräften im Fokus der Studie stand, nahmen alle Teilnehmenden zur Vermeidung von Gruppeneffekten (vgl. z. B. Laatz 1993) im **Einzelverfahren** an der Studie teil.

Datengewinnung: Die Daten zu allen drei Forschungsfokussen wurden in einer einzigen Erhebung (je Probandin bzw. Proband) erfasst. Der Erhebungsphase wurde jeweils eine Phase der Beschäftigung der Probandinnen und Probanden mit dem AR-Lehr-Lern-Tools vorgeschaltet (detaillierte Beschreibung des Ablaufs s. Publikation 8 ab Seite 35). Da die persönlichen Einschätzungen von Grundschullehrkräften dem theoretisch ausdifferenzierten Konstrukt PU im Kontext eines eng abgegrenzten Bezugsrahmens (Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken, vgl. Publikation 4) erfasst werden sollten, wurde die subjektzentrierte Erhebungsmethode des **Interviews** gewählt (vgl. Aeppli et al. 2016: 178 f). Die Teilnehmenden wurden zu Beginn des Interviews und auch währenddessen darauf hingewiesen, dass sie sich jederzeit sowohl auf den „ist-Zustand“ des Lehr-Lern-Tools (Forschungsfokus 1: PU des **aktuellen Stands** des AR-Lehr-Lern-Tools), auf Verbesserungs- und Veränderungsvorschläge (Forschungsfokus 2: **zu verbessernde Aspekte** zur Steigerung der PU des AR-Lehr-Lern-Tools) sowie auf Unterschiede zwischen Brillen-AR- und der Tablet-AR-Variante (Forschungsfokus 3: **Unterschiede** zwischen der Brillen-AR-Variante und der Tablet-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. der PU) beziehen können.

Um sicherzustellen, dass alle Dimensionen der PU im Laufe des Interviews trotz flexibler Gesprächsführung inhaltlich in vergleichbarer Weise adressiert werden, wurde ein **Leitfaden** für das Interview (s. a. Leitfadengestütztes Interview, Loosen 2014) theoriegeleitet konzeptioniert und vorab erprobt (vgl. Aeppli et al. 2016: 185 f). Er umfasst sowohl verbindliche Hauptfragen als auch gegebenenfalls einsetzbare Detailfragen für eventuelle Nachfragen oder zur Sicherung des Verständnisses (vgl. ebd.: 181,183,185; Pospeschill 2013: 130). Bei der Konzeption bzw. Entwicklung des Leitfadens sowie während der Durchführung des Interviews wurden auch Aspekte wie eine Einführung in das Thema des Interviews (vgl. Aeppli et al. 2016: 185; Atteslander 2008), ein offener Gesprächseinstieg sowie eine höfliche und eine wertschätzende Umgangsweise (vgl. Aeppli et al. 2016: 186ff) beachtet. Eine ausführliche Erläuterung des Leitfadens und der Durchführung des Interviews ist in der Publikation 8 ab Seite 35 zu finden.

Während der Interviews wurde jeweils eine Audio-Aufnahme angefertigt, welche anschließend in ein **einfaches Transkript** überführt wurde (Dresing & Pehl 2012: 20 ff). Die Transkription

der Audioaufnahmen erlaubte die Generierung eines leicht zugänglichen Datensatzes, anhand dessen die inhaltliche Analyse zur Adressierung der genannten drei Forschungsfokuse vollzogen werden konnte (vgl. z. B. Aeppli et al. 2016: 190).

Datenanalyse: Zur Adressierung der drei Forschungsfokuse wurde der **gleiche Datensatz** dreimal in nahezu identischer methodischer Weise, aber jeweils im Hinblick auf einen anderen Forschungsfokus analysiert. Hierfür wurden drei identische Kopien des gewonnenen Datensatzes jeweils mit einer entsprechenden temporären „Vorcodierung“ versehen bzgl. Aussagen der Grundschullehrkräfte zum „Ist-Zustand“ des Lehr-Lern-Tools (Forschungsfokus 1: PU des **aktuellen Stands** des AR-Lehr-Lern-Tools), bzw. zu Verbesserungs- und Veränderungsvorschlägen (Forschungsfokus 2: **zu verbessernde Aspekte** zur Steigerung der PU des AR-Lehr-Lern-Tools) bzw. zu Unterschieden zwischen der Brillen-AR-Variante und der Tablet-AR-Variante (Forschungsfokus 3: **Unterschiede** zwischen der Brillen-AR-Variante und der Tablet-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. der PU). Als Analysemethode wurde mit der **qualitativen Inhaltsanalyse** (Mayring 2022) ein **inhaltsanalytisches Verfahren** herangezogen, da das zentrale Erkenntnisziel in der qualitativen Erfassung und Beschreibung der subjektiven Sichtweisen der Grundschullehrkräfte aus thematisch strukturierten Daten zu einem theoretisch ausgearbeiteten Konstrukt (PU) bestand (vgl. Aeppli et al. 2016: 233 f, 237 f). Ziel eines inhaltsanalytischen Verfahrens ist entsprechend eher die sinngemäße, ggf. verdichtete Beschreibung von Sachverhalten als deren Interpretation (ebd.: 256).

Im Rahmen dieser Studie qualitative Inhaltsanalyse folgt einem vorgegebenen **Ablauf**, bestehend aus der Festlegung und Charakterisierung des Materials (also der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Transkripte), der Analyse und Berücksichtigung der Entstehungssituation (detailliert beschrieben in Publikation 8 ab Seite 35), der Bestimmung der Art der passenden Analysetechnik, der theoriegeleiteten Ausdifferenzierung der Fragestellung bzw. des Forschungsfokus in Bezug auf das Material sowie schließlich der Analyse des Materials und der darauffolgenden Interpretation der Ergebnisse (vgl. Aeppli et al. 2016: 257 f; Lamnek 1989).

Während der Analyse des Materials werden Kategorien gebildet, anhand derer die Daten bzgl. der zugrundeliegenden Fragestellung oder des zugrundeliegenden Forschungsfokus systematisiert bzw. beschrieben werden können (vgl. Aeppli et al. 2016: 257). Da das der Studie zugrundeliegende theoretische Konstrukt (PU) über zehn inhaltlich konkretisierte Dimensionen definiert ist, wurde die oberste Kategorienebene, die Ebene der **Hauptkategorien deduktiv**, also theoriegeleitet (Mayring 2022: 96 ff) gebildet, indem jede Dimension der PU eine Kategorie eröffnete. **Subkategorien** zu diesen zehn Hauptkategorien wurden anschließend **induktiv**, also aus dem Material heraus (ebd.: 84 ff) konstruiert, also

durch Analyse der Transkripte. Diese Kombination aus deduktivem und induktivem Vorgehen (vgl. Aeppli et al. 2016: 259) bei der Kategorienbildung führt dazu, dass die Inhaltsanalyse innerhalb der **Subkategorien** eher einen **zusammenfassenden** Charakter mit dem Ziel der Datenverdichtung aufweist. Hingegen erfüllt die Zuordnung zu den **Hauptkategorien** eine **strukturierende** Funktion (vgl. ebd.: 258; Mayring 2022: 96 ff) mit dem Ziel der Zuordnung der Subkategorien zu den verschiedenen Dimensionen der PU. Bei der Bildung der Subkategoriensysteme sowie bei der Zuordnung konkreter Daten zu Kategorien(-systemen) sind die inhaltliche Genauigkeit der (Zuordnung zu den) Kategorien anhand präziser inhaltlicher Abgrenzungen oder Indikatoren, die Exklusivität (keine Mehrfachzuordnung) sowie die Exhaustivität (Vollständigkeit) der Zuordnung aller Daten zu beachten (vgl. Pospeschill 2013: 91). Bei der induktiven Konstruktion der Subkategorien wurde ein Dreischritt-Vorgehen aus Paraphrasierung, Generalisierung und Reduktion (vgl. Aeppli et al. 2016: 260; Mayring 2022: 69 ff) angewandt, sodass die Einschätzungen der Grundschullehrkräfte inhaltlich möglichst unverändert in beschreibender Weise dargestellt werden konnten.

Da aufgrund des qualitativen Designs **inhaltliche Repräsentativität** (und keine statistische Repräsentativität) angestrebt wurde, wurden so lange neue Daten erhoben, bis eine inhaltliche Sättigung erreicht war (vgl. Aeppli et al. 2016: 235, 261 f; Brüsemeister 2008: 30). Der der Eruierung des Kategoriensystems zugrunde gelegte Datensatz umfasste schließlich dreizehn Fälle.

Der gesamte Analyseprozess wurde mit einem **Codierleitfaden** (vgl. Aeppli et al. 2016: 260 f; Mayring 2022: 62) nachvollziehbar dokumentiert (vgl. auch: Gütekriterien qualitativer Forschung s. z. B. Aeppli et al. 2016: 262 f). In diesem Leitfaden wurden alle Kategorien inhaltlich definiert – entweder aus der Theorie oder dem Material heraus – und mit Ankerbeispielen illustriert. Das gewonnene Kategoriensystem stellt in seiner Gesamtheit das Ergebnis der Analyse dar.

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt schätzen die Grundschullehrkräfte die PU des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken in allen zehn Dimensionen als mindestens teilweise vorhanden ein (Forschungsfokus 1: PU des **aktuellen Stands** des AR-Lehr-Lern-Tools). Allerdings besteht noch Möglichkeiten zur Verbesserung der PU, insbesondere in Bezug auf die Anpassung an individuelle Unterschiede und Bedürfnisse unter den Lernenden sowie in Bezug auf (adaptives Echtzeit-)Feedback an die Lernenden (Forschungsfokus 2: **zu verbessernde Aspekte** zur Steigerung der PU des AR-Lehr-Lern-Tools). Aussagen der Lehrkräfte bzgl. Unterschieden zwischen der Tablet-AR-Variante und der Brillen-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools

beziehen sich hauptsächlich auf motivationale Aspekte (Forschungsfokus 3: **Unterschiede** zwischen der Brillen-AR-Variante und der Tablet-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. der PU).

Auffallend bezüglich der Beurteilung der PU des AR-Lehr-Lern-Tools durch die Grundschullehrkräfte ist, dass die Lehrkräfte einerseits beim Vergleich des AR-Lehr-Lern-Tools mit einer bestmöglichen Alternative ohne AR sowie beim Vergleich zwischen der Tablet-AR-Variante und der Brillen-AR-Variante des AR-Lehr-Lern-Tools kaum bzw. gar nicht aus medien- und / oder fachdidaktischer Sicht argumentieren, sondern auf einer pädagogischen oder meist gar einer pragmatischen Argumentationsebene verbleiben. In weiterführenden Studien könnte daher untersucht werden, inwiefern die mangelnde Kenntnis bzw. Vorerfahrung bzgl. des Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen seitens der Grundschullehrkräfte einen Grund für diesen Umstand darstellen könnte.

Darüber hinaus sollten in weiteren Studien auch angehende Lehrkräfte befragt werden (für diese Studie konnten keine angehenden Lehrkräfte gewonnen werden), da diese sich bzgl. Fachkenntnissen und / oder Expertise in Bezug auf den Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen von praktizierenden Grundschullehrkräften unterscheiden könnten.

Da es sich bei dem verwendeten AR-Lehr-Lern-Tool um ein Prototyp im Entwicklungsstadium handelte, muss das AR-Lehr-Lern-Tool (nach weiterer Optimierung) in realen Lehr-Lern-Situationen erprobt werden, um die im Rahmen dieser Studie als Vermutung zu verstehenden Einschätzungen der Grundschullehrkräfte zu überprüfen bzw. an der Realsituation zu validieren. Für eine solche Optimierung können die Ergebnisse der hier beschriebenen Studie wichtige Anhaltspunkte liefern.

Publikation 8: ‹Pedagogical Usability› von Augmented Reality zum Thema Elektrik – Eine qualitative Studie zum Potential des Einsatzes von AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe

Autor*innen: Luisa Lauer¹, Markus Peschel¹

Art der Publikation: Forschungsbeitrag in einer Fachzeitschrift

Reviewprozess: Einreichung – vorläufige Annahme – Überarbeitung – endgültige Annahme (Peer-Review)

Eingereicht: 30.04.2022

Angenommen: 24.10.2022

Publiziert: 12.01.2023

Abgedruckt mit Erlaubnis von: Luisa Lauer, Markus Peschel

Erschienen in: *MedienPädagogik*, 51, 25–64

Copyright: © 2023, Die Autor*innen; Lizenznehmer: MedienPädagogik

Lizenz: CC BY 4.0 (Attribution 4.0 International)

Eigener Arbeitsanteil:

Haupt-Verfassung des Manuskripts, Haupt-Planung der skizzierten Studie, Durchführung der Studie, Datenauswertung

Beiträge der Mit-Autor*innen:

Markus Peschel: Mit-Verfassung des Manuskripts, Konzeptionelle Beratung und Unterstützung

¹Universität des Saarlandes, Didaktik der Primarstufe: Sachunterricht

Themenheft Nr. 51:

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

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

«Pedagogical Usability» von Augmented Reality zum Thema Elektrizität

Eine qualitative Studie zum Potenzial des Einsatzes von AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe

Luisa Lauer¹  und Markus Peschel¹ 

¹ Universität des Saarlandes

Zusammenfassung

Die Technologie Augmented Reality (AR) eröffnet durch Anreicherung der realen Welt mit virtuellen Informationen innovative pädagogisch-didaktische Gestaltungsmöglichkeiten in Lehr-Lern-Situationen. Insbesondere im Sachunterricht der Primarstufe besteht derzeit noch ein erhebliches Desiderat zur Erforschung des pädagogisch-didaktischen Potenzials des Einsatzes von AR sowie grundsätzlich zur Konzeption und Implementation entsprechender AR-Lehr-Lern-Tools. Ziel der in diesem Beitrag beschriebenen Studie ist die Erlangung grundlegender Erkenntnisse zur Einschätzung der «Pedagogical Usability» eines AR-Lehr-Lern-Tools für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht durch Grundschullehrpersonen. Diese durch Befragung von Grundschullehrpersonen gewonnenen Einschätzungen wurden in einem qualitativen Design mittels eines leitfadengestützten Interviews erfasst und durch eine strukturierende qualitative Inhaltsanalyse ausgewertet. Insgesamt zeigt sich, dass das evaluierte AR-Lehr-Lern-Tool einige Teilaspekte der Pedagogical Usability aus Sicht der Lehrpersonen erfüllt (z. B. «Motivation» und «Student Control») und in anderen Teilen noch verbessert werden könnte (z. B. bzgl. «Applicability» und «Feedback»). Auffallend ist auch, dass die Lehrpersonen die pädagogisch-didaktischen Vorteile von AR nicht oder kaum erkennen und die Unterschiede zwischen verschiedenen AR-Technologien auch nur teilweise benennen oder erkennen können. Die Ergebnisse stellen eine erste Grundlage für weitere Untersuchungen zur Rolle der Lehrperson bei der Entwicklung, Evaluation und Implementierung hoch innovativer, technologiegestützter Lehr-Lern-Tools sowie für die Erforschung des pädagogisch-didaktischen Potenzials von AR zu weiteren Themen des Sachunterrichts dar.



Lauer, Luisa, und Markus Peschel. 2023. «Pedagogical Usability» von Augmented Reality zum Thema Elektrizität. Eine qualitative Studie zum Potenzial des Einsatzes von AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe. *MedienPädagogik* 51 (AR/VR-Part 2): 25–64. <https://doi.org/10.21240/mpaed/51/2023.01.11.X>.

The «Pedagogical Usability» of Augmented Reality on Electrics. A Qualitative Study on the Potential of Implementing AR in Primary Science Studies

Abstract

Augmented Reality (AR) technology facilitates innovative pedagogical-didactical design possibilities in educational situations by enriching the real world with virtual information. Especially for primary science studies, there is still a considerable research desideratum concerning the pedagogical and didactical potential of the use of AR as well as for the conception and implementation of corresponding AR tools in general. The aim of the study presented in this paper is to obtain basic insights into how primary school teachers assess the «pedagogical usability» of an AR tool for primary science studies. These assessments, obtained through interviews with primary school teachers, were collected in a qualitative design using a guided interview and evaluated using a structuring qualitative content analysis. Overall, the evaluated AR tool fulfils some sub-aspects of pedagogical usability from the teachers' point of view (e.g. «motivation» and «student control») and could still be improved in other parts (e.g. regarding «applicability» and «feedback»). It is also evident that the teachers do not or hardly recognize the pedagogical-didactical advantages of AR and can also only partially identify or even name differences between types of AR technologies. The results provide a preliminary basis for further investigations on the teacher's role in conceptualizing, evaluating, and implementing highly innovative, technically supported educational tools and for exploring the pedagogical-didactical potential of AR on other topics in primary science and social studies.

1. Einleitung

Die Alltags- und Lebenswelt ist von zunehmender Durchdringung mit immersiven Technologien wie Augmented Reality (AR), z. B. in Form von Unterhaltungsmedien geprägt (Kind et al. 2019). Im Bildungsbereich eröffnen sich durch AR aufgrund innovativer Charakteristika neue pädagogisch-didaktische Gestaltungsmöglichkeiten (Winther et al. 2022; Lauer und Peschel 2020). Obwohl sich ein Trend zum vermehrten Einsatz von AR in (ausser-)schulischen Lehr-Lern-Situationen zeigt, gibt es bislang nur wenige Erkenntnisse bzgl. pädagogisch-didaktischer Konzepte oder Modellierungen des Einsatzes oder der Evaluation von AR (Avila-Garzon et al. 2021; Wyss et al. 2022). Aufgrund des unmittelbaren Bezugs zur Lebenswelt (GDSU 2013) und des bislang geringen Bestands an Forschungen bzw. Entwicklungen zu AR und Virtual Reality (VR) (Bakenhus et al. 2022) besteht insbesondere im Sachunterricht der Primarstufe ein grosses Desiderat bzgl. der Erlangung grundlegender Erkenntnisse zum Potenzial des Einsatzes von AR und bzgl. der Entwicklung entsprechender pädagogisch-didaktischer Konzepte.

Ergänzend zu Modellierungen von Aufgaben-Klassifikationen bei der Integration innovativer Technologien (SAMR-Modell, Puentedura 2015), zum eher medien-didaktisch ausgerichteten Diskurs der Orchestrierung technologiegestützten Lernens (Prieto et al. 2011; Weinberger 2018) und der Mehrwert-Debatte (z. B. Krommer 2019) wird hier die «Pedagogical Usability» (Nielsen 1993; Nokelainen 2005; Silius et al. 2013) zur Evaluation des Potenzials von AR-Lehr-Lern-Tools herangezogen. Sie erlaubt eine summative kategoriengeleitete Bewertung eines (AR-)Lehr-Lern-Tools bzgl. verschiedener pädagogischer Gesichtspunkte. Da es zur Pedagogical Usability von AR-Lehr-Lern-Tools insbesondere für den Sachunterricht der Primarstufe kaum Befunde gibt, wurde zur explorativen Gewinnung grundlegender Einschätzungen der Pedagogical Usability von AR-Lehr-Lern-Tools exemplarisch ein solches Tool für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht zum Thema Elektrizität durch Grundschullehrpersonen in einem qualitativen Studiendesign evaluiert. Die Ergebnisse der Studie können als Grundlage für weitere Forschungen dienen und für mögliche Verallgemeinerungen bzgl. der Pedagogical Usability anderer AR-Lehr-Lern-Tools oder von AR im Allgemeinen herangezogen werden.

2. Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst ein Überblick über pädagogisch-didaktische Charakteristika von AR und den Forschungsstand zum Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts) gegeben. Anschliessend wird die Pedagogical Usability technologiegestützter Lehr-Lern-Tools erläutert und der diesbezügliche Forschungsstand mit Fokus auf immersive Technologien (AR und VR) dargestellt. Danach werden Charakteristika der praxisnahen Forschung am Subjekt «(Grundschul-)Lehrperson» erläutert. Schliesslich wird das bzgl. seiner Pedagogical Usability zu evaluierende AR-Lehr-Lern-Tool für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht vorgestellt, und die Ziele der Studie werden expliziert.

2.1 AR in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts)

Als «Augmented Reality» wird die Anreicherung der Wahrnehmung durch digitale Inhalte (Azuma et al. 2001, 34) mit der Ermöglichung von Echtzeit-Interaktion mit virtuellen Objekten (Dunleavy 2014) bezeichnet. Die reale Umgebung fungiert als Hauptbezugsebene, die mit speziellen AR-Geräten um virtuelle Informationen ergänzt wird (Milgram und Kishino 1994). Eine für die im Rahmen dieses Beitrags anwendbare Differenzierung von AR-Technologien liefern Milgram et al. (1995): Sie unterscheiden monitorbasierte AR-Anwendungen, z. B. für PC, Tablet und Smartphone, welche die am häufigsten in Alltagswelt und Bildungsbereich verwendete

AR-Technologie darstellen (Akçayır und Akçayır 2017), und Anwendungen für spezielle Brillen (z. B. Microsoft HoloLens), die mittels integrierter Displays AR unmittelbar im Sichtfeld erzeugen. Letztere sind in Alltagswelt und Bildungsbereich bislang eher wenig verbreitet (ebd.). Dies kann vor allem durch die komplexe Bedienung der Geräte, den erhöhten technischen Betreuungsaufwand und vor allem durch die derzeit sehr hohen Kosten für AR-Brillen erklärt werden.

Digitale Abbilder der Realität wie die Kamerasicht in einem mobilen Displaygerät werden aus technischer Perspektive als «real» definiert (Demarmels 2012); somit sind in diesem Verständnis nur die digitalen Objekte, die ohne ein AR-fähiges Gerät nicht wahrgenommen werden können, «virtuell». Diese Visualisierungs-Technologien von AR (AR-Brillen bzw. Tablet- oder Smartphone-AR) unterscheiden sich neben der Handhabung vor allem in Hinsicht auf die wahrnehmbaren Objektrepräsentationen (Ainsworth 2006; Schnotz und Bannert 2003). Durch AR-Brillen werden virtuelle Objekte scheinbar direkt in die Wahrnehmung der realen Umgebung an einer konkret-ikonischen Repräsentation (Purchase 1998) eingebunden, während sie bei Display-AR in einem digital replizierten Abbild der realen Umgebung an einer konkret-ikonischen Repräsentation (ebd.) zu sehen sind: der Kamerasicht des Smartphones oder Tablets. Vor allem aus fachdidaktischer Sicht könnte dieser Unterschied zwischen einer scheinbaren Einblendung in der Realität und einer Einblendung in der digital replizierten Realität von Bedeutung sein: Die AR-Brille könnte eher eine Verschmelzung der Realität mit den virtuell eingeblendeten Informationen erlauben und als AR-Gerät aufgrund ihrer permanenten Fixierung auf dem Kopf eher in den Hintergrund der Wahrnehmung treten. Währenddessen verbleibt ein Smartphone oder Tablet stets als bewusst wahrgenommenes Gerät zwischen den realen Objekten sowie den Nutzenden (also den Lernenden) bestehen. Diese hier vermuteten Unterschiede in der Wirkung der beiden AR-Technologien in Lehr-Lernsituationen sollten zukünftig genauer erforscht werden.

Trotz bestehender technischer Implementations- und Nutzungshürden (Munoz-Cristobal et al. 2015; Radu 2014) gibt es Forschungen und verschiedene Entwicklungen zu AR in Lehr-Lern-Situationen der Primar- und Sekundarstufe (Arici et al. 2019). Diese eröffnen verschiedene pädagogische Ansätze (Garzón et al. 2020), z. B. neue und adaptive Individualisierungsmöglichkeiten von Lehr-Lern-Situationen (Anderson und Anderson 2019). AR kann den Wissens- und Fertigkeitserwerb unterstützen (Garzón und Acevedo 2019) und zu mehr Lernerfolg führen (Schweiger et al. 2022). AR besitzt zudem ein hohes Motivations- und Interaktionspotenzial und kann darüber hinaus die Zusammenarbeit von Lernenden und die langfristige Erinnerung an Gelerntes verbessern (Radu 2014). Beim Lernen mit multiplen Repräsentationen kann AR unterstützend wirken (Radu und Schneider 2019): Durch visuelle Integration verschiedener Informationskanäle im Blickfeld der Lernenden kann AR

unter anderem die kognitive Belastung reduzieren (Thees et al. 2020; Altmeyer et al. 2020). Allerdings können insbesondere AR-Brillen zu einer Überlastung führen (Buchner, Buntins und Kerres 2021). Wie auch bei anderen Technologien müssen die Benutzung von AR-Geräten und die Interaktion bzw. Orientierung in AR von Lehrenden wie auch von Lernenden erst erlernt werden, bevor AR tatsächlich zur Unterstützung beim Lernen eingesetzt werden kann (Zender et al. 2018). Besonders viele pädagogisch-didaktische Entwicklungen und Forschung gibt es zu AR mit Bezug zu naturwissenschaftlichen Themen (Arici et al. 2019), speziell zu Elektrik (für Physik bzw. Sachunterricht, vgl. Lauer und Peschel 2020). Angesichts der geringen Zahl an Entwicklungen und Forschungen zu AR für den Sachunterricht der Primarstufe (Lauer und Peschel 2022) besteht dort ein besonderes Interesse zur Gewinnung grundlegender Erkenntnisse zum Potenzial des Einsatzes von AR. Zudem müssen AR-Lehr-Lerntools aus technischer Sicht für Kinder im Grundschulalter noch weiter angepasst werden, insbesondere auf deren physische und motorische Charakteristika und Fertigkeiten: Kinder im Grundschulalter haben in der Regel kürzere Arme und eine höhere Stimmlage (falls eine Sprachsteuerung notwendig ist) als Erwachsene, für die die AR-Geräte üblicherweise kalibriert sind (Radu und MacIntyre 2012).

2.2 Pedagogical Usability von (immersiven) Lehr-Lern-Anwendungen

Eine Ergänzung der Mehrwert-Debatte (s. Kapitel 1) stellt der Ansatz zur Beurteilung der Nützlichkeit von AR in Lehr-Lern-Situationen im «Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments» (Nielsen 1993, s. Abb. 1) dar. Das Modell induziert eine summative kategoriengeleitete Beurteilung der Nützlichkeit (Usefulness) eines technologiegestützten Lehr-Lern-Tools (wörtlich: «Umgebung»), welche sich letztlich auf dessen Akzeptanz in Lehr-Lern-Situationen auswirkt. Diese Nützlichkeit (Usefulness) setzt sich zusammen aus der auf technische Gesichtspunkte fokussierten «Benutzbarkeit» (Usability) und dem pädagogisch-didaktischen Nutzen (Utility). Die «Benutzbarkeit» technologiegestützter Lehr-Lern-Tools für pädagogische Zwecke stellt einen Unter-Aspekt dieses Nutzens (Utility) dar und wird durch den Begriff der «Pedagogical Usability» beschrieben (Nielsen 1993; Nokelainen 2005; Silius et al. 2013). Die Pedagogical Usability umfasst wiederum selbst verschiedene Teil-Aspekte, die in Tabelle 1 näher erläutert werden. Die Pedagogical Usability wurde für diese Studie als Konstrukt zur Beschreibung der Wirkung eines Lehr-Lern-Tools in einer Lehr-Lernsituation gewählt, weil sie klar definierte, pädagogisch-didaktische Aspekte umfasst und insbesondere durch die Verortung im beschriebenen «Model of Usefulness» einen systematischen Medienvergleich – und damit eine Systematisierung der Mehrwert-Debatte – ermöglicht.

Neben Befunden zur Pedagogical Usability von technologiegestützten Lehr-Lern-Tools zur Förderung des Leseverständnisses (Zurita et al. 2019) oder zu gender-spezifischen Unterschieden bzgl. der von Lernenden empfundenen Pedagogical Usability (Djalev und Bogdanov 2019) gibt es auch einige Forschungen zur Pedagogical Usability von Lehr-Lern-Tools mit Virtual Reality (VR), z. B. aus dem medizinischen (Myllymäki 2019) oder technischen Bereich (Pinho et al. 2015). Hier könnten zukünftige Forschungen zur Pedagogical Usability von AR-Lehr-Lern-Tools anknüpfen. Instrumente zur Erfassung der Pedagogical Usability wurden von Nokelainen (2006) sowie von Silius, Tervakari und Pohjolainen (2013) konstruiert und erprobt.

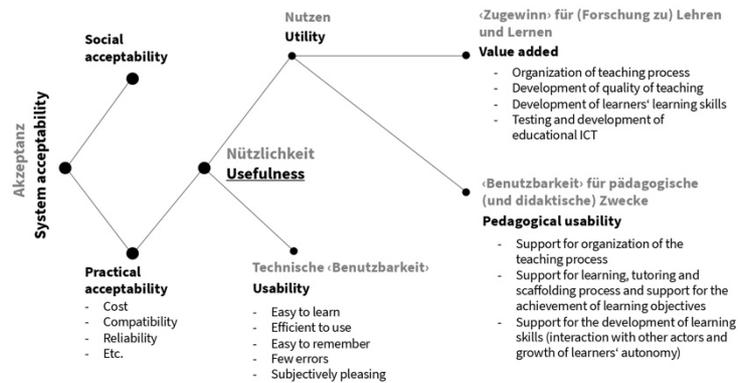


Abb. 1: «Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments» (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius und Tervakari 2003, eigene Darstellung, eigene Übersetzungen, eigene Hervorhebung).

Aspekt der PU	Erläuterung
Student Control	Kontrollierbarkeit / Steuerbarkeit des Lernprozesses durch die Lernenden bei der Arbeit mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Student Activity	Eigene Aktivitäten der Lernenden bei der Arbeit mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Collaborative & Cooperative Learning	Miteinander-Arbeiten (in sozialer oder technischer Hinsicht) mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Guidance to Purposes	Klarheit bzgl. des zugrundeliegenden Fachinhaltes, Transparenz der adressierten Lernziele für die Lernenden beim Arbeiten mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Applicability	Passung des AR-Lehr-Lern-Tools auf individuelle Fähigkeiten und Fertigkeiten der Lernenden, Transferierbarkeit auf andere Kontexte
Added Value	Vorteile des AR-Lehr-Lern-Tools gegenüber einem Setting ohne dieses
Motivation	Spaß der Lernenden; Interesse oder Anreize zur längeren Beschäftigung durch die Arbeit mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Valuation of Prior Knowledge	Anknüpfung des AR-Lehr-Lern-Tools an alltägliches oder schulisches Vorwissen
Flexibility	Verfügbarkeit von Anpassungsmöglichkeiten an individuelle Unterschiede im Lernweg zwischen Lernenden bei der Arbeit mit dem AR-Lehr-Lern-Tool
Feedback	Rückmeldung an die Lernenden durch das AR-Lehr-Lern-Tool

Tab. 1: Beschreibung der Aspekte der Pedagogical Usability (PU), adaptiert für AR nach Nokelainen (2005) und Sales Junior et al. (2016).

2.3 Praxisnahe Forschung am Subjekt «(Grundschul-)Lehrperson»

Praxisnahe Forschung greift pädagogisch-didaktische Probleme aus Schule und Unterricht auf und versucht, diese unter Einbindung von Akteur:innen aus der schulischen Praxis zu adressieren (Klewin und Tillmann 2019). Lehrpersonen nehmen bzgl. der Integration und Akzeptanz innovativer Technologien in schulischen Lehr-Lern-Situationen eine wichtige Rolle ein (Petko und Döbeli Honegger 2011) – insbesondere angesichts rasanter Weiterentwicklungen wie im Fall der Technologie AR (Tzima, Styliaras und Bassounas 2019) und sollten daher in den Prozess der Konzeption, Gestaltung und Erprobung entsprechender Lehr-Lern-Tools involviert werden. Zur reflektierten Einschätzung technologiegestützter (und insb. AR-gestützter) Lehr-Lern-Tools müssen Lehrpersonen über eine spezifische Schnittmenge aus fachlichem, pädagogisch(-didaktischem) Wissen und speziellem technologischem (hier: AR-bezogenem) Wissen sowie über Wissen um Vernetzungen zwischen diesen Bereichen verfügen (vgl. TPACK Modell: Harris und Hofer 2011). Entsprechend sollte praxisnahe Forschung mit dem/am Subjekt «Lehrperson» auf einen empathischen,

wertschätzenden Umgang mit der Lehrperson und ihrer Expertise sowie auf eine stetige Vergegenwärtigung ihres Beitrags zur zugrundeliegenden Forschung achten, um möglichst authentische und ungezwungene Aussagen zu erhalten (Ritchie 2006).

Wegen der Vielperspektivität des Sachunterrichts (GDSU 2013) und der damit verbundenen Bezüge zu zahlreichen Fächern der späteren Sekundarstufen müssen Grundschullehrpersonen über ein breites Spektrum an fachlicher Expertise verfügen. Allerdings scheinen Grundschullehrpersonen naturwissenschaftliche Fachinhalte aus verschiedenen Gründen eher weniger zu adressieren (Peschel 2007), und sie scheinen bzgl. naturwissenschaftlicher Themen – insbesondere solchen mit Fachbezug zur Chemie oder zur Physik – stabile, eher negativ behaftete Überzeugungen (Dunker 2016) zu besitzen. Daher scheint besonders bei naturwissenschaftlichen Fachbezügen im Sachunterricht der Einbezug der Lehrpersonen in die Forschung und Entwicklung innovativer didaktischer Tools von Interesse und von grosser Notwendigkeit zu sein.

2.4 AR-Lehr-Lern-Tool zur Visualisierung von Schaltsymboliken

Aufgrund bestehender pädagogisch-didaktischer Forschungen und Entwicklungen zu AR für das Thema Elektrizität – bislang vornehmlich für den Physikunterricht der Sekundarstufen, vgl. Lauer und Peschel 2020 – wurde ein AR-Lehr-Lern-Tool zum Thema Elektrizität für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht (Lauer et al. 2022, s. Abb. 2) konzipiert, konstruiert und im Rahmen mehrerer Vorstudien erprobt. Wegen der Problematik der Verwendung von Modellvorstellungen bei Kindern zum Thema Elektrizität (vgl. Haider und Fölling-Albers 2020) wurde der Fachinhalt «Schaltsymboliken», also Symbole zu Bauteilen und (Teilen von) Schaltungen, gewählt. Der Fachinhalt wurde für diese Studie exemplarisch herangezogen und insbesondere fand keine vielperspektivische Auseinandersetzung / Vernetzung im Sinne der Didaktik des Sachunterrichts (GDSU 2013) statt. Der Sachunterricht der Primarstufe endet in Deutschland in der Regel nach der Klassenstufe 4, das AR-Lehr-Lern-Tool kann aber noch bis mindestens zur Klassenstufe 6 im Naturwissenschaftsunterricht mit Fachbezug zur Physik eingesetzt werden.

Im Gegensatz zu bisher verfügbaren Steckbrett-Systemen mit aufgedruckten Symbolen besteht die Innovation dieses AR-Lehr-Lern-Tools und damit auch der Vorteil gegenüber einem Tool ohne AR in der Echtzeit-Anzeige von Symboliken unmittelbar an realen Schaltungen mit sichtbaren Kabelverläufen. Diese Symboliken stellen eine symbolische Repräsentation (Bruner, Olver und Greenfield 1971, 29) der Schaltung bzw. ihrer Komponenten dar und sind in Echtzeit mit diesen verschränkt. Das Tool kann im Sachunterricht sowohl zur Einführung in die Symboliken bzw. in elektrische Schaltungen als auch in entsprechenden Übungsstunden eingesetzt werden. Die Lernenden können selbstständig verschiedene Möglichkeiten des

Verbindens von Schaltungskomponenten und der Konstruktion einer funktionierenden Schaltung erkunden. Eine farbliche Hervorhebung der virtuellen Symbole von Komponenten verdeutlicht die Zusammengehörigkeit zwischen Bauteil und Symbol. Die virtuelle Schaltskizze passt sich stets an die Verbindung der Bauteile an: Sie zeigt die strukturierteste und einfachste Anordnung der Symbole an und orientiert sich eben nicht an der räumlichen Position der realen Komponenten der Schaltung. Dies soll die Abstraktion zwischen den Komponenten der Schaltung und deren (einfachster) symbolischer Repräsentation unterstützen (Lauer et al. 2022). Das Tool wurde in einer Version für AR-Brillen (s. Online-Video «Demo Brille», Link im Anhang) und für Tablet-AR (s. Online-Video «Demo Tablet», Link im Anhang) realisiert.



Abb. 2: AR-Lehr-Lern-Tool zur Echtzeit-Visualisierung von Schaltsymboliken aus der Sicht der AR-Brille bzw. aus der Kamerasicht eines Display-Geräts. Links: Symbole einzelner Bauteile und farbliche Hervorhebung bei Berührung. Mitte: Schaltskizze einer offenen Schaltung. Rechts: Schaltskizze einer geschlossenen Schaltung (Lauer et al. 2022).

Alle Bauteile bestehen aus speziell für dieses Tool entwickelten Boxen, in die jeweils eine Batterie, eine Lampe oder ein Schalter integriert ist. Auch die Kabel verfügen über eine solche Box, denn dadurch ist es möglich, alle Bauteile zu jedem Zeitpunkt bzgl. ihres Zustandes (z. B. beim Schalter: offen oder geschlossen) und bzgl. ihrer Verbindung mit anderen Bauteilen zu charakterisieren. Diese Informationen werden über ein drahtloses Netzwerk an eine Anwendung auf einem Computer übertragen, die daraufhin die zu visualisierenden Symbole bzw. Schaltskizzen errechnet. Durch die Marker auf den Bauteilen können diese virtuellen Symbole bzw. Schaltskizzen räumlich passend angezeigt werden. Eine Änderung am realen Aufbau wird in der Regel in weniger als einer halben Sekunde sichtbar an den virtuellen Symboliken. Die Soft- und Hardware wurde entwickelt vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) Kaiserslautern, Arbeitsgruppe Paul Lukowicz, in partizipatorischem Austausch mit der AG Didaktik des Sachunterrichts der Universität des Saarlandes von Markus Peschel. Als AR-Brille wurde die HoloLens 2 von Microsoft verwendet. Sie wurde im Rahmen einer vorherigen Studie positiv bzgl. ihrer Usability bei der Benutzung durch Grundschul Kinder evaluiert (Lauer et al. 2021). In der Anwendung zur Visualisierung der Symboliken ist keine Steuerung durch Interaktion mit virtuellen Objekten möglich, die virtuellen Symbole können lediglich betrachtet werden.

2.5 Ziele der Studie

Das übergeordnete Ziel der Studie ist die explorative Erlangung grundlegender Einschätzungen der Pedagogical Usability von AR-Lehr-Lern-Tools für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht durch Grundschullehrpersonen am Beispiel des beschriebenen AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken. Hierbei soll zwischen der Einschätzung des derzeitigen Stands der Entwicklung, der Einschätzung bzgl. möglicher zukünftiger Entwicklungen (mögliches Verbesserungspotenzial) sowie Unterschieden zwischen AR-Brillen und Tablet-AR differenziert werden. Daraus ergibt sich für die Studie folgende Leitfrage mit drei entsprechenden Teilfragestellungen:

Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Lehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools zum Thema Schaltskizzen (als AR-Brillen-Variante und als AR-Tablet-Variante) für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht als gegeben/noch nicht gegeben?

Teilfragestellung 1: Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Grundschullehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools (als AR-Brillen-Variante oder als AR-Tablet-Variante) als (nicht) gegeben?

Teilfragestellung 2: Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Grundschullehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools (als AR-Brillen-Variante oder als AR-Tablet-Variante) als noch nicht gegeben / verbesserungswürdig?

Teilfragestellung 3: Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der AR-Brillen- und der AR-Tablet-Variante sehen Grundschullehrpersonen bzgl. der Einzelaspekte der Pedagogical Usability?

Die gewonnenen Ergebnisse werden sich auf einen frühen Stand der Gestaltung und Erprobung des AR-Lehr-Lern-Tools beziehen und können zukünftig durch erneute Evaluationen mit stärkerem Praxisbezug ergänzt werden.

3. Methode

Zunächst werden Stichprobe und Studiendesign beschrieben. Anschließend folgt die Darlegung des Studienablaufs und der Datengewinnung.

3.1 Stichprobe

An der Studie nahmen 13 (4 m, 9 w, Alter: $M=48,1$ Jahre, $SD=6,5$ Jahre) praktizierende Grundschullehrpersonen mit abgeschlossener Berufsausbildung teil. Im Sachunterricht behandeln sie naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Themen in etwa gleich gerne (naturwissenschaftliche Themen: $M=4,38$, $SD=0,76$;

sozialwissenschaftliche Themen: $M=3,85$, $SD=0,68$, jeweils auf einer fünfstufigen Likert-Skala von 1 «gar nicht gerne» bis 5 «total gerne»). Neun Personen kannten die Technologie AR noch nicht, vier Personen kannten AR, verfügten aber über keine persönlichen Erfahrungen damit.

3.2 Studiendesign

Aufgrund des in 2.5 dargelegten explorativen Forschungsinteresses angesichts der geringen Anzahl vorhandener wissenschaftlicher Befunde zur Beurteilung der Pedagogical Usability von AR-Lehr-Lern-Tools durch Grundschullehrpersonen und des Ziels der Erfragung von Einschätzungen wurde ein qualitativer Ansatz gewählt. Da in der Einschätzung der Pedagogical Usability die subjektive Sichtweise der Grundschullehrpersonen von Bedeutung ist, wurde die Einschätzung zu den Aspekten der Pedagogical Usability mithilfe eines problemzentrierten Interviews (Kurz et al. 2007) erfasst. Wegen der inhaltlichen Begrenztheit des zu erfassenden Konstrukts wurde das Interview vorstrukturiert, und die Impulsfragen wurden vorbereitet.

3.3 Ablauf und Datengewinnung

Vor Beginn der Studie füllten die Teilnehmenden eine Online-Vorabfrage (s. Online-Anhang «Vorab-Befragung») zu demografischen Angaben sowie zur Affinität zu sozial- bzw. naturwissenschaftlichen Themen im Sachunterricht und zu ihren Vorkenntnissen über AR aus. Alle Teilnehmenden nahmen im Einzelverfahren an der Studie teil und besuchten aufgrund der pandemischen Lage während des Studienzeitraums ein universitäres Forschungslabor ausserhalb ihrer Dienstzeit.

Zu Beginn wurden die Teilnehmenden informiert, dass sie zwei Varianten des Prototyps eines innovativen pädagogisch-didaktischen Tools ausprobieren und dann mit ihrer professionellen Expertise evaluieren können. Sie erhielten eine kurze mündliche Erklärung der Technologie AR, probierten die AR-Brille an und führten unter Assistenz der Versuchsleitung eine Kalibrierung des Geräts an die Augen durch. Anschliessend machten die Teilnehmenden sich unter Führung der Versuchsleitung mit den realen Bauteilen der elektrischen Schaltung vertraut. Danach probierten sie das AR-Lehr-Lern-Tool zuerst unter Assistenz der Versuchsleitung in der Tablet-Version und dann weitgehend selbstständig in der Brillen-Version aus. Während die Teilnehmenden die Brillen-Version benutzten, konnte die Versuchsleitung über einen Echtzeit-Stream die Ansicht der Teilnehmenden in AR am Computer mitverfolgen. Die Teilnehmenden beschäftigten sich insgesamt etwa 20 Minuten lang mit dem Ausprobieren der AR-Tools. Anschliessend wurden sie zu ihrer Einschätzung der Pedagogical Usability des AR-Lehr-Lern-Tools mithilfe eines leitfadengestützten Interviews (Loosen 2014) (s. Online-Anhang «Ablauf Interview») befragt.

Um das Konstrukt der Pedagogical Usability inhaltlich bestmöglich erfassen zu können, wurden die leitenden Impulsfragen vorab theoriegeleitet entwickelt, mit fünf Lehrpersonen in einer Pilotstudie erprobt und sukzessiv optimiert (siehe Abb. 3 für eine exemplarische Darstellung dieses Prozesses für «Student Control»). Die inhaltliche Grundlage bildeten die Ausarbeitung von Sales Junior et al. (2016) zur Pedagogical Usability sowie die Items des Instruments zu deren Messung von Nokelainen (2006). Die Leitfrage wurde so optimiert, dass die Teilnehmenden von sich aus auf möglichst viele inhaltliche Gesichtspunkte des zu erfassenden Aspekts der Pedagogical Usability eingingen. Zusätzlich wurden je nach Situation notwendige Anschlussfragen zu einzelnen Gesichtspunkten formuliert.

Student Activity (Sales Junior et al. 2016):

- Alle Aktivitäten sind an Bedürfnisse der Schüler:innen angepasst
- Schüler:innen müssen selbst aktiv werden

Items zu Student Activity (Nokelainen 2006), eigene Übersetzungen: Nr. 3,4,5,6,7,8,9,10

- «Ich musste nachdenken und eigene Lösungen finden.»
- «Das Material ist in klare Sinn-Abschnitte unterteilt.»
- «Probleme/Aufgaben werden ohne vorgefertigten Lösungsweg präsentiert.»
- «Ich muss selbst recherchieren.»
- «Ich vergesse währenddessen alles um mich herum.»
- «Ich kann mir spezielle, eigene Informationen beschaffen und mich selbst zum Experten machen.»
- «Ich muss meine eigenen Lösungen finden.»
- «Ich kann eigene, bedeutsame Lösungen/Ergebnisse produzieren.»



Leitfrage zu Student Activity:
Beschreiben Sie, was genau die Schüler:innen in der konkreten Unterrichtssituation mit diesen Bauteilen und Geräten machen könnten bzw. machen würden (zunächst mal ohne, dass Sie ihnen einen konkreten Auftrag geben)?

Ggf. notwendige Nachfragen/Anschlussfragen:

- Eigenes «Ausprobieren»?
- Eigene Ideen der Schüler:innen integrierbar?
- Was müsste Ihrer Meinung nach noch an den Geräten und Bauteilen verändert werden, um den vielfältigere/andere Aktivitäten der Schüler:innen zu ermöglichen?

Abb. 3: Konstruktion der Interview-Fragen für «Student Control» im Rahmen der Pilotierung.

Zu Beginn des Interviews betonte die Versuchsleitung nochmals den Prototyp-Charakter des AR-Lehr-Lern-Tools und stellte eine «Eisbrecherfrage» («Wie ist es Ihnen ergangen?»). Anschliessend stellte sie die zehn aus dem Leitfaden abgeleiteten Impulsfragen (eine Frage je Aspekt der Pedagogical Usability) und nutzte gegebenenfalls Nachfragen, die die Teilnehmenden beantworteten. Alle Interviews wurden mit einem Diktiergerät aufgezeichnet. Nach Beendigung des Interviews wurden die Teilnehmenden über die zugrundeliegende(n) Forschungsfrage(n) informiert. Nachdem sich im Rahmen der letzten Interviews eine inhaltliche Sättigung andeutete, wurde die Datenerhebung abgeschlossen.

Die Audio-Aufzeichnungen der Interviews wurden nach Dresing und Pehl (2018) transkribiert. Es wurden Passagen entfernt, in denen über nicht mit der Studie in Verbindung stehende Inhalte gesprochen wurde (z. B. Smalltalk). Die Transkripte wurden mit anonymisierten Codenamen versehen. Für jede der in 2.5 explizierten Teilfragestellungen wurde eine strukturierende, qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring und Fenzl (2019) durchgeführt (s. Online-Anhang «MAXQDA-Dateien»). Für jede der drei Analysen fungierten die zehn Aspekte der Pedagogical Usability (s. Kapitel 2.2) als deduktive, theoriegeleitete Hauptkategorien. Subkategorien wurden induktiv am Material entwickelt durch Sammeln, Paraphrasierung, Generalisierung und Reduktion der gewonnenen Daten (s. Online-Anhang «Codier-Leitfaden»).

4. Ergebnisse

Der Studie wurde folgende übergeordnete Fragestellung mit den folgenden Teilfragestellungen zugrunde gelegt (vgl. 2.5):

Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Lehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools zum Thema Schaltskizzen (als AR-Brillen-Variante und als AR-Tablet-Variante) für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht als gegeben / noch nicht gegeben?

Teilfragestellung 1: Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Grundschullehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools (als AR-Brillen-Variante und als AR-Tablet-Variante) als (nicht) gegeben?

Teilfragestellung 2: Welche Aspekte der Pedagogical Usability sehen Grundschullehrpersonen bzgl. des AR-Lehr-Lern-Tools (als AR-Brillen-Variante und als AR-Tablet-Variante) als noch nicht gegeben / verbesserungswürdig?

Teilfragestellung 3: Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der AR-Brillen-Variante und der AR-Tablet-Variante sehen Grundschullehrpersonen bzgl. den Teilen der Pedagogical Usability?

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Studie für jede Teilfragestellung dargestellt. Da die Aspekte der Pedagogical Usability für jede Teilfragestellung jeweils die theoriegeleiteten Hauptkategorien darstellen, ergeben sich deren inhaltliche Beschreibungen aus der in Kapitel 2.2 dargestellten Tabelle (s. Tab. 1). Die sehr umfangreichen Kategoriensysteme mit Ankerbeispielen sind im Anhang (Tab. A1 bis Tab. A3) zu finden. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse nehmen darauf Bezug.

4.1 *Einschätzung der Pedagogical Usability*

Die Befragten sehen erfüllte Gesichtspunkte bei allen Aspekten der Pedagogical Usability (s. Tab. 2). Die Aussagen der Befragten liessen sich wegen ihrer Ähnlichkeit zu den meisten Aspekten der Pedagogical Usability zu einem Gesamtbild ergänzen. Lediglich bzgl. der Überforderung der Lernenden durch die Benutzung des Tools («Student Control») und bzgl. der Vorteile des AR-Lehr-Lern-Tools gegenüber einem Non-AR-Setting («Added Value») gab es unterschiedliche Einschätzungen. Beispielsweise wurde zu «Added Value» einerseits gesagt:

«B: [...] Also den Mehrwert sehe ich tatsächlich darin, dass es, dass es sehr konkret die praktische Verbindung zur Theorie gibt. Es ist ganz augenscheinlich, es wird ein direkter Bezug hergestellt und dieser Schritt, sage ich mal, vom Experimentieren auf dem Tisch und das dann händisch anbringen an die Tafel oder an Smartboard oder wie auch immer, der wird hier ja sehr, sehr reduziert. Das heisst, es ist sehr, sehr nahe am Geschehen dran und ich glaube von daher auch deutlich verständlicher. Oder sehr verständlich für die Schüler in der direkten Zuordnung was, was ist.» (Interview «Freddie», Abs. 54. Tab. A1, Kategoriensystem E_Added Value, Kategorie 1.1: Verschränkung von Objekt und zugehöriger symbolischer Repräsentation).

Dieser Bestätigung steht diese skeptische Einschätzung zu «Added Value» gegenüber:

«B: Ja aber jetzt einen Mehrwert gegenüber den Kästen, die wir haben oder den Materialien die wir haben (... , überlegt) kann ich jetzt so auf ad-hoc nicht erkennen.» (Interview «Bea», Abs. 58. Tab. A1, Kategoriensystem E_Added Value, Kategorie 4: Kein Mehrwert).

Eine vollständige Darstellung des zugrundeliegenden Kategoriensystems («Erfüllte Aspekte») inkl. Ankerbeispiele befindet sich in Tabelle A2 im Anhang. Tabellarische Einzelfallübersichten sind im Online-Anhang («Einzelfallübersicht FS_a», https://osf.io/4u6ce?view_only=56ac0f543d734aa68991e21f738aae5e) zu finden.

Aspekt der PU	Einschätzung der Lehrpersonen (zugehörige Teile des Kategoriensystems im Anhang)
Student Control	Ermöglichung der Benutzung der Tools durch Lernende ohne Über- oder Unterforderung bzw. mit eventueller Überforderung der Lernenden; Notwendigkeit der Einweisung und ggf. Betreuung durch die Lehrperson und Notwendigkeit der Einhaltung (aufgestellter) Regeln zur Benutzung der Geräte und Schaltungskomponenten
Student Activity	Ermöglichung des Ausprobierens eigener Lösungswege beim Arbeiten mit den Bauteilen und dem Bauen verschiedener Schaltung(-szustände)
Collaborative & Cooperative Learning	Möglichkeit zur Arbeit in Gruppen mit Rollenverteilung und gemeinsamer Nutzung der Bauteile, wobei Lernende gegenseitig voneinander profitieren können
Guidance to Purposes	Anbahnung von Kompetenzen bzgl. des naturwissenschaftlichen Experimentierens und Arbeitens und der Verwendung von Symbolsprache; Anbahnung fachlicher Kompetenzen bzgl. (Komponenten von) elektrischen Schaltungen und deren symbolischer Repräsentation sowie zur Funktionsweise von elektrischen Schaltungen im Sachunterricht
Applicability	Weitgehende Passung bzgl. physischer Spezifika von Grundschulkindern (ca. ab Klassenstufe 3); Möglichkeit der Adressierung unterschiedlicher Leistungsstärken (durch ggf. Reduktion der Komponenten); Passung auch für Lernende mit geringen sprachlichen Fähigkeiten bzgl. des Erlernens der Symboliken
Added Value	Kein oder kaum merklicher Vorteil gegenüber einer Version ohne AR; Möglichkeit zur Loslösung von gesprochener Sprache durch Echtzeit-Symboliken, Screenshot-Sicherung der Ansicht in AR, Entlastung der Lehrperson durch gleichzeitige Unterstützung aller Lernenden und Echtzeit-Verschärkung von Objekt und symbolischer Repräsentation
Motivation	Hoher Spassfaktor, grosses Interesse, hoher Anreiz zur (längeren) Beschäftigung durch AR-Technologie, wobei diese Effekte mit der Zeit nachlassen könnten
Valuation of Prior Knowledge	Anknüpfung an (alltägliches) Vorwissen zur Nutzung technischer Geräte und an Alltagserfahrungen mit elektrischen Geräten; Anknüpfung an Vorwissen zum elektrischen Strom und zu elektrischen Schaltungen und ihren Komponenten
Flexibility	Vorhandensein vieler verschiedener Möglichkeiten zum Verbinden von Komponenten und (einiger) verschiedener Wege zum Bau einer funktionierenden Schaltung
Feedback	Echtzeit-Feedback bzgl. Änderungen in der Verbindung von Komponenten oder des Zustands der Schaltung (offen vs. geschlossen) durch Schaltsymboliken

Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse zur derzeitigen Einschätzung der Pedagogical Usability des AR-Lehr-Lern-Tools.

4.2 Zu verbessernde oder weiterzuentwickelnde Aspekte

Die Befragten sehen einige zu verbessernde bzw. zukünftig zu entwickelnde Gesichtspunkte bei allen Aspekten der Pedagogical Usability bis auf «Student Activity» und «Motivation» (s. Tab. 3). Ihre Aussagen liessen sich bei allen genannten Aspekten der Pedagogical Usability zu der dargestellten tabellarischen Zusammenfassung ergänzen.

Zur «Applicability» wurde unter anderem von den Teilnehmenden angeregt, Fachbegriffe in AR bei Bedarf zu visualisieren:

«B: Oder dass man die Möglichkeit zumindest hat, das Wort ein- und auszublen- den, das wäre auch eine Möglichkeit.» (Interview «Max», Abs. 5. Tab. A2, Kategoriensystem Z_Applicability, Kategorie 2.1: Visuelle sprachliche/begriffliche Ergänzungen)

Eine vollständige Darstellung des zugrundeliegenden Kategoriensystems («Zukünftige Entwicklungen») inkl. Ankerbeispielen befindet sich in Tabelle A2 im Anhang. Tabellarische Einzelfallübersichten sind dem Online-Anhang («Einzelfallübersicht FS_b», https://osf.io/4u6ce?view_only=56ac0f543d734aa68991e21f738aae5e) zu entnehmen.

Aspekt der PU	Zusammenfassung: Einschätzung der Lehrpersonen (zugehörige Teile des Kategoriensystems im Anhang)
Student Control	Ermöglichung der Interaktion mit virtuellen Objekten in AR, Implementation verschiedener, frei wählbarer Visualisierungs-Modi in AR
Collaborative & Cooperative Learning	Ermöglichung des Teilens der Ansicht in AR und Implementation einer «Überblicksansicht» für Lehrende
Guidance to Purposes	Visualisierung des Zustands der Schaltung (offen oder geschlossen) in AR durch «leuchtendes» Lampensymbol, Hinzufügung von Bildern oder Informationen zu Aussehen, Funktion und Anwendungsgebieten der Schaltungskomponenten
Applicability	Farbliche Kennzeichnung der Zusammengehörigkeit von Komponente und Symbol für Lernende mit schwächerer Repräsentationskompetenz, Hinzufügen visueller oder auditiver Verbalisierungen für Lernende mit schwächerer sprachlicher Kompetenz, Erweiterung von Art und Umfang der Schaltungskomponenten für komplexere Schaltung für leistungsstärkere Lernende, Hinterlegung weiterführender Informationen zu Schaltungen, Strom etc. für Interessierte
Added Value	Zusätzliche (modellhafte) Visualisierung von Elektronenbewegungen in Abhängigkeit vom Zustand der Schaltung, Ermöglichung der Speicherung des Arbeitsstandes in der Anwendung
Valuation of Prior Knowledge	Angleichung der physischen Schaltungskomponenten an das Aussehen alltäglicher Bauteile, Angleichung der AR-Schaltskizze an die Anordnung der realen Komponenten

Aspekt der PU	Zusammenfassung: Einschätzung der Lehrpersonen (zugehörige Teile des Kategoriensystems im Anhang)
Flexibility	Hinzufügung verschiedener Aufgabenvariationen zu Schaltsymboliken in der AR-Anwendung
Feedback	Implementation visueller oder auditiver Echtzeit-Rückmeldungen zu Aktionen der Lernenden beim Verbinden der Komponenten und zum aktuellen Zustand der Schaltung (offen, geschlossen, fehlerhaft)
Flexibility	Vorhandensein vieler verschiedener Möglichkeiten zum Verbinden von Komponenten und (einiger) verschiedener Wege zum Bau einer funktionierenden Schaltung
Feedback	Echtzeit-Feedback bzgl. Änderungen in der Verbindung von Komponenten oder des Zustands der Schaltung (offen vs. geschlossen) durch Schaltsymboliken

Tab. 3: Zusammenfassung der Ergebnisse zu zukünftigen Entwicklungen zur Verbesserung der Pedagogical Usability des AR-Lehr-Lern-Tools.

4.3 Unterschiede zwischen Brillen- und Tablet-Version

Die Befragten sehen Unterschiede zwischen der Brillen- und der Tablet-Version des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. «Student Control», «Collaborative and Cooperative Learning», «Applicability», «Motivation» und «Valuation of Prior Knowledge» (s. Tab. 4). Auch hier liessen sich ihre Aussagen bei allen genannten Aspekten der Pedagogical Usability zu der dargestellten tabellarischen Zusammenfassung ergänzen.

Zu «Motivation» wurde beispielsweise vermutet:

«B: Ja also das ist auch ganz klar. Ich glaube die Brille ist der höchste Spassfaktor (lachen). Also in der Rangordnung wird die Brille am meisten beigestern und dann aber auch das Tablet auch. Ja durchaus.» (Interview «Freddie», Abs. 58. Tab. A3, Kategoriensystem U_Motivation, Kategorie 1: Intrinsische Motivation)

Eine vollständige Darstellung des zugrundeliegenden Kategoriensystems («Unterschiede Brille – Tablet») inkl. Ankerbeispielen befindet sich in Tab. A3 im Anhang. Tabellarische Einzelfallübersichten sind im Online-Anhang («Einzelfallübersicht FS_c», https://osf.io/4u6ce?view_only=56ac0f543d734aa68991e21f738aae5e) zu finden.

Aspekt der PU	Zusammenfassung: Einschätzung der Lehrpersonen (zugehörige Teile des Kategoriensystems im Anhang)
Student Control	Die Brillen-Version erfordert mehr Betreuung und Begleitung durch die Lehrperson als die Tablet-Version
Collaborative & Cooperative Learning	Die Brillen-Version besitzt grössere Hürden im Teilen der eigenen Ansicht in AR gegenüber der Tablet-Version
Applicability	Die Brillen-Version ist weniger passend für die physischen und kognitiven Voraussetzungen von Grundschulkindern als die Tablet-Version
Motivation	Die Brillen-Version verursacht mehr Motivation (Spass/Interesse/Anreiz) als die Tablet-Version
Valuation of Prior Knowledge	Die Brillen-Version knüpft weniger an alltägliches Vorwissen zur Nutzung und Bedienung technischer Geräte an als die Tablet-Version

Tab. 4: Zusammenfassung der Ergebnisse zu Unterschieden zwischen der Pedagogical Usability der Brillen- und der Tablet-Version des AR-Lehr-Lern-Tools.

5. Diskussion

Die Ergebnisse werden differenziert nach den jeweiligen Teilfragestellungen diskutiert. Abschliessend werden die Limitationen der Studie erläutert.

5.1 Einschätzung der Pedagogical Usability

Die subjektiven Einschätzungen der Befragten zur möglichen Wirkung des AR-Lehr-Lern-Tools bzgl. der Aspekte «Student Control», «Collaborative & Cooperative Learning» und «Motivation» gehen einher mit bisherigen empirischen Befunden zu Wirkungen von AR in Lehr-Lern-Situationen (vgl. 2.1). Dies deutet darauf hin, dass bisherige Befunde zum Einsatz von AR in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts) zu den genannten Aspekten auch für dieses AR-Lehr-Lern-Tool anwendbar sind. Die genannten Einschätzungen zu «Student Activity», «Guidance to Purposes», «Applicability», «Valuation of Prior Knowledge», «Flexibility» und «Feedback» stimmen mit den in 2.3 dargestellten Charakteristika des AR-Lehr-Lern-Tools überein. Dies deutet darauf hin, dass die Lehrpersonen die intendierten Funktionalitäten des AR-Lehr-Lern-Tools, die adressierbaren Lernziele und die Einsatzmöglichkeiten im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht erkannt haben. Einzig die Abstraktion von der räumlichen Anordnung der Bauteile zur vereinfachten strukturierten Anordnung der zugehörigen Symbole in der Schaltskizze (s. 2.4) schien nicht erkannt worden zu sein, da dieses Lernziel von den Befragten nicht genannt wurde. Bezüglich der Vorteile des AR-Lehr-Lern-Tools gegenüber einem vergleichbaren Setting ohne AR («Added Value») herrscht ein geteiltes Meinungsbild, wobei die Mehrheit keinen Mehrwert des AR-Lehr-Lern-Tools erkennt. Einige Befragte nennen Aspekte, die eher dem AR-Gerät (Screenshot-Speicherung, gleichzeitige Betreuung vieler

Lernender) als der AR selbst zuzuschreiben sind (vgl. Tab. A 1, Kategoriensystem E_Added Value). Nur wenige Befragte nennen die Echtzeit-Verschränkung realer und virtueller Objekte bzw. Informationen als Vorteil des AR-Lehr-Lern-Tools.

5.2 Zu verbessernde oder zu entwickelnde Aspekte

Die Befragten führten zu allen Aspekten der Pedagogical Usability ausser «Student Control» und «Motivation» Verbesserungswünsche an. Dies geht einher mit der weitgehenden Beurteilung dieser beiden Aspekte als erfüllt (s. 4.1 bzw. 5.1). Die zu «Guidance to Purposes» bzw. «Added Value» genannten zukünftigen Entwicklungen adressieren eine Ausweitung der adressierten Lernziele über die derzeit intendierten Inhalte hinaus, z. B. die Visualisierung nicht beobachtbarer modellhafter Elektronenbewegungen. Dies wurde allerdings aufgrund der in 2.3 dargestellten Problematik der Verwendung von Modellvorstellungen bei Kindern beim Thema Elektrizität (Haider und Fölling-Albers 2020) bewusst nicht adressiert.

Die Anregung bzgl. der Möglichkeit zur Speicherung von Arbeitsständen in der Anwendung (bei «Added Value») sowie der Vorschlag bzgl. der Implementation verschiedener Aufgabenvariationen in AR (bei «Flexibility») sind durchaus interessant für zukünftige Weiterentwicklungen. Allerdings sind dies Aspekte, die für jedes (neue) technologiegestützte Lehr-Lern-Tool wünschenswert sind und sich nicht auf AR beschränken.

Die Verbesserungen bzgl. der Ermöglichung von mehr Interaktivität in AR («Student Control»), die Implementation mehrerer (adaptiver) Differenzierungs-Modi bzgl. fachlicher oder sprachlicher Kompetenzen der Lernenden («Applicability») und der Echtzeit-Reaktion der Anwendung auf Aktionen der Lernenden oder auf den Zustand der Schaltung durch visuelle oder auditive Hinweise («Feedback») zielen genau auf die (sich aus den technischen Charakteristika von AR ergebenden) pädagogisch-didaktischen Potenziale (s. 2.1) des Einsatzes von AR in Lehr-Lern-Situationen (des Sachunterrichts) ab und sollten daher im Rahmen der künftigen Optimierung des AR-Lehr-Lern-Tools unbedingt berücksichtigt werden. Gleiches gilt für den geäußerten Wunsch der Angleichung des Erscheinungsbildes der Komponenten der Schaltung an das Aussehen von entsprechenden Objekten in gängigen Experimentier-Kästen (bei «Valuation of Prior Knowledge») und für die gewünschte Einsicht in die Perspektive der Lernenden beim Zusammenarbeiten und zum Zweck der Betreuung (bei «Collaborative & Cooperative Learning»).

5.3 Unterschiede zwischen Brillen- und Tablet-Version

Die zu «Collaborative & Cooperative Learning» bzw. zu «Applicability» angeführten Unterschiede bilden die technischen Verschiedenheiten von Brillen- und Tablet-AR-Technologie (s. 2.1) ab, z. B. den höheren Betreuungsaufwand und die ggf. geringere Passung auf physische oder kognitive Voraussetzungen von Kindern im Grundschulalter bei AR-Brillen. Es wird vermutet, dass die Brillen-Technologie den Lernenden weit weniger bekannt bzw. vertraut sein wird («Valuation of Prior Knowledge») als die Tablet-Technologie (vgl. dazu 2.1). Dies geht einher mit der Einschätzung der Befragten zu mehr notwendiger Betreuung zur Sicherstellung der Kontrollierbarkeit der AR-Brillen-Variante im Vergleich zur Tablet-Version («Student Control») und der Vermutung, dass die «neue» AR-Brille mehr Spass oder Interesse bei den Lernenden hervorrufen wird als die eher vertraute Tablet-Version («Motivation»). Die Befragten nannten keine Unterschiede zwischen den beiden Varianten bzgl. «Guidance to Purposes», «Flexibility» und «Feedback». Dies könnte dadurch erklärt werden, dass diese Aspekte der Pedagogical Usability nicht durch die Art des AR-Geräts verändert werden, solange die in AR gezeigten Inhalte identisch sind. Allerdings beschrieben die Befragten auch keine Unterschiede zwischen den beiden Varianten bzgl. der «Student Activity»: Sie erkannten nicht, dass bei der Tablet-Variante das AR-Gerät in der Hand gehalten (oder bei Befestigung in einer Halterung zum Sehen der AR-Inhalte ggf. ständig neu ausgerichtet oder aufgesucht) werden muss, während die Lernenden bei der Brillen-Version die Hände stets zum Experimentieren zur Verfügung haben und die AR-Inhalte permanent wahrnehmen können. Am auffälligsten scheint jedoch, dass die Befragten keine Unterschiede bzgl. des «Added Value» benennen, obwohl die Brillen-Variante das Realobjekt (Bauteil bzw. Schaltung) mit einer symbolischen Repräsentation anreichert, was in der Tablet-Variante in der Kamera-Sicht an einer depiktionalen Repräsentation (Purchase 1998) des Realobjekts geschieht (vgl. Kapitel 2.1).

5.4 Limitationen der Studie

Eine wesentliche Limitation stellt die durch die zur Zeit der Datenerhebung herrschende Pandemielage bedingte Realisierung als Laborstudie dar (gegenüber einer Situation, in der die Lehrenden das Tool im schulischen Unterricht erproben und dabei beobachtet bzw. anschliessend befragt werden). Daher müssen die Ergebnisse als erste Evaluation des Lehr-Lern-Tools in einem frühen Stadium der technischen und pädagogisch-didaktischen Gestaltung angesehen werden. Nach entsprechender Optimierung unter Einbezug der genannten zukünftigen Entwicklungen könnte eine erneute Evaluation des AR-Lehr-Lern-Tools im Rahmen von schulischer Praxiserprobung Ergebnisse liefern, die eine höhere Transferierbarkeit auf reale Unterrichtssituationen aufweisen. Allerdings bieten die Ergebnisse auch interessante

Ansätze zur Erforschung der Evaluationskompetenz von (Grundschul-)Lehrpersonen bzgl. des Potenzials (innovativer) technologiegestützter Lehr-Lern-Tools (s. 5.1 und 5.3). Eine weitere Limitation stellt die Adaption der Reihenfolge der während des Interviews an die Befragten gestellten Impulsfragen dar, die situativ im Sinne des Gesprächsflusses und der Authentizität der Situation je nach Äusserungen der bzw. des Befragten angepasst wurde. Dies verringert zwar die Vergleichbarkeit zwischen den Teilnehmenden, jedoch schienen sich die Aussagen aller Teilnehmenden in den meisten Punkten zu einem kohärenten Gesamteindruck zu ergänzen.

Mit dieser Studie kann nicht die Frage beantwortet werden, ob die befragten Lehrpersonen die Echtzeit-Verschränkung realer und virtueller Objekte bzw. Informationen als Vorteil des AR-Lehr-Lern-Tools gegenüber einem Lehr-Lern-Tool ohne AR oft nicht genannt haben, weil sie ihn nicht erkannt haben oder weil sie diese Echtzeit-Verschränkung als nicht bedeutsam genug für eine Erwähnung eingestuft haben (Fragestellung 1, Ergebnisse in 5.1). Ebenso verhält es sich mit den von den befragten Lehrpersonen nicht genannten Unterschieden zwischen der AR-Brillen-Variante und der AR-Tablet-Variante bzgl. der wahrnehmbaren Repräsentationen von Objekten (Fragestellung 3, Ergebnisse in 5.3). Beides müsste in weiteren Studien untersucht werden.

6. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend deutet die Einschätzung durch Grundschullehrpersonen darauf hin, dass das AR-Lehr-Lern-Tool zum Thema Elektrizität alle Aspekte der Pedagogical Usability mindestens in Teilen erfüllt, wobei «Motivation» und «Student Activity» am ehesten erfüllt sind und bezüglich «Student Control», «Applicability» und «Feedback» das grösste Verbesserungspotenzial gesehen wurde.

Insgesamt scheint das AR-Lehr-Lern-Tool Potenzial für den praktischen Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe aufzuweisen. Weitere Optimierungen sind allerdings möglich und sinnvoll, um insbesondere die technischen und damit auch die pädagogisch-didaktischen Gestaltungsmöglichkeiten von AR noch weiter auszuerschöpfen. Allerdings weicht bezüglich des «Added Value» die Einschätzung der Befragten zum derzeitigen Stand der Entwicklung und zu den Unterschieden zwischen Brillen- und Tablet-Variante von den aus den technischen Charakteristika abgeleiteten pädagogisch-didaktischen Vorteilen von AR gegenüber einer ansonsten gleichen Situation ohne AR (bzw. von den Vorteilen von AR-Brillen gegenüber Tablet-AR) ab. Diese Vorteile beziehen sich auf konkrete pädagogisch-didaktische Unterstützungs- oder Gestaltungsaspekte, die sich durch die jeweils eingesetzte Technologie eröffnen und die mit einer anderen Technologie nicht realisiert werden können. In einer weiteren Studie könnte daher untersucht werden, zu welchem Anteil diese Befunde eher durch einen «zu geringen» Vorteil des AR-Lehr-Lern-Tools gegenüber

einem Non-AR-Szenario (bzw. der Brillen-Variante gegenüber der Tablet-Variante) zu erklären sind oder ob die Nicht-Nennung dieser Unterschiede eher durch die fehlende Erfahrung der Teilnehmenden in Bezug auf die Technologie AR und deren pädagogisch-didaktische Charakteristika und Potenziale zustande gekommen ist. Diese weiterführenden Untersuchungen könnten ggf. Aufschluss geben über die Expertise von (Grundschul-)Lehrpersonen als Akteur:innen aus der Praxis bzgl. der Beurteilung innovativer technologiegestützter Lehr-Lern-Tools.

Wie anfangs beschrieben (s. Einleitung), induzieren die Pedagogical Usability und das übergeordnete «Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments» (Nielsen 1993) eine kategoriengeleitete summative Evaluation pädagogisch-didaktischer (technologiegestützter) Lehr-Lern-Tools, die einen interessanten Ansatz für die pädagogisch-didaktisch reflektierte Implementation digitaler Technologien in Lehr-Lern-Situationen darstellt. Ausgehend von der «Usefulness» von AR im Sachunterricht skizzieren Lauer und Peschel (2023 i.V.) die Möglichkeit zur Verschmelzung bestehender Modellierungen zum Einsatz oder zur Wirkung von digitalen Technologien im (Sach-)Unterricht zu einer gemeinsamen Modellierung unter der Leitidee einer kategoriengeleiteten «Usefulness».

Zukünftig könnten auch weitere Einsatzmöglichkeiten von AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht (Lauer und Peschel 2022) realisiert und evaluiert werden. Die Befunde, die im Rahmen dieser Studie für den Fachinhalt «Symboliken» im Kontext Elektrik gewonnen wurden, könnten bzgl. ihrer Übertragbarkeit auf andere Fachinhalte im Sachunterricht oder anderen Fächern der Primarstufe untersucht werden, bei denen Symboliken und / oder der Umgang mit multiplen Repräsentationen eine Rolle spielen. Ausserdem sollte AR als Aspekt der «Digitalität» (gesellschaftliche Veränderungen durch die Digitalisierung, Irion und Knoblauch 2021) dringend in theoretischen Diskursen adressiert werden.

Literatur

- Ainsworth, Shaaron. 2006. «DeFT: A Conceptual Framework for Considering Learning with Multiple Representations». *Learning and Instruction* 16 (3): 183–98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>.
- 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>.
- Altmeyer, Kristin, Sebastian Kapp, Michael Thees, Sarah Malone, Jochen Kuhn, und Roland Brünken. 2020. «The Use of Augmented Reality to Foster Conceptual Knowledge Acquisition in STEM Laboratory Courses – Theoretical Background and Empirical Results». *British Journal of Educational Technology* 51 (Januar): 611–28. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>.

- Anderson, Cindy L., und Kevin M. Anderson. 2019. «Wearable Technology: Meeting the Needs of Individuals with Disabilities and Its Applications to Education». In *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL)*, herausgegeben von Ilona Buchem, Ralf Klamma, und Fridolin Wild, 59–77. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64301-4_3.
- Arici, Faruk, Pelin Yildirim, Şeyma Caliklar, und Rabia M. Yilmaz. 2019. «Research Trends in the Use of Augmented Reality in Science Education: Content and Bibliometric Mapping Analysis». *Computers & Education* 142 (Dezember): 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>.
- Azuma, Ronald, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon J. Julier, und Blair MacIntyre. 2001. «Recent advances in augmented reality». *IEEE Computer Graphics and Applications* 21 (6): 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>.
- Avila-Garzon, Cecilia, Jorge Bacca-Acosta, Kinshuk, Joan Duarte, und Juan Betancourt. 2021. «Augmented Reality in Education: An Overview of Twenty-Five Years of Research». *Contemporary Educational Technology* 13 (3): ep302. <https://doi.org/10.30935/cedtech/10865>.
- Bakenhus, Silke, Marisa Alena Holzapfel, Nicolas Arndt, und Maja Brückmann. 2022. «Die Erstellung einer Lernumgebung mit immersiver Virtual Reality für das Fach Sachunterricht nach dem M-iVR-L Modell». *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 47 (April): 76–93. <https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.04.X>.
- Bruner, Jerome S., Rose R. Olver, und Patricia M. Greenfield. 1971. *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Buchner, Josef, Katja Buntins, und Michael Kerres. 2022. «The Impact of Augmented Reality on Cognitive Load and Performance: A Systematic Review». *Journal of Computer Assisted Learning* 38 (1): 285–303. <https://doi.org/10.1111/jcal.12617>.
- Demarmels, Sascha. 2012. «Als ob die Sinne erweitert würden ... Augmented Reality als Emotionalisierungsstrategie». *IMAGE*, Nr. 16: 34–51.
- Djalev, Liubomir, und Stanislav Bogdanov. 2019. «Age and Gender Differences in Evaluating the Pedagogical Usability of E-Learning Materials». *English Studies at NBU* 5 (2): 169–89. <https://doi.org/10.33919/esnbu.19.2.0>.
- Dresing, Thorsten, und Thorsten Pehl. 2018. *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*. 8. Auflage. Marburg: Eigenverlag.
- Dunker, Nina. 2016. «Berufsbezogene und epistemologische Beliefs von Grundschullehrkräften zum Experimentieren im naturwissenschaftlichen Sachunterricht». In *Wege durch den Forschungsdschungel*, herausgegeben von Nina Dunker, Nina-Kathrin Joyce-Finnern, und Ilka Koppel, 61–79. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-12095-5_3.
- Dunleavy, Matt. 2014. «Design Principles for Augmented Reality Learning». *TechTrends* 58 (1): 2834. <https://doi.org/10.1007/s11528-013-0717-2>.
- 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, 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>.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), Hrsg. 2013. *Die Didaktik des Sachunterrichts und ihre Fachgesellschaft GDSU e.V.* Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Haider, Michael, und Maria Fölling-Albers. 2020. «Auswirkungen von Analogiemodellen auf den Aufbau konzeptuellen Wissens im Sachunterricht der Grundschule – Beispiel Stromkreis». *Unterrichtswissenschaft* 48 (3): 469–91. <https://doi.org/10.1007/s42010-020-00077-5>.
- Harris, Judi, und Mark J. Hofer. 2011. «Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) in action: A descriptive study of secondary teachers' curriculum-based, technology-related instructional planning». *Journal of Research on Technology and Education* 43 (3): 211–29. <https://doi.org/10.1080/15391523.2011.10782570>.
- Irion, Thomas, und Verena Knoblauch. 2022. «Lernkulturen in der Digitalität. Von der Buchschule zum zeitgemäßen Lebens- und Lernraum im 21. Jahrhundert», April. <https://doi.org/10.25656/01:24387>.
- Kind, Sonja, Jan-Peter Ferdinand, Stephan Richter, und Sebastian Weide. 2019. «Virtual und Augmented Reality – Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen». Arbeitsbericht Nr. 180. Berlin, Bad Honef: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. <https://www.wandel-ostthueringen.de/wp-content/uploads/2020/10/VR-AR-Status-Quo.pdf>.
- Klewin, Gabriele, und Klaus-Jürgen Tillmann. 2019. «Lehrer*innenforschung, Praxisforschung und Forschendes Lernen – Ein Bericht über Bielefelder Erfahrungen». *PraxisForschungLehrer*innenBildung. Zeitschrift für Schul- und Professionsentwicklung.*, Dezember, 1–19. <https://doi.org/10.4119/PFLB-3172>.
- Krommer, Axel. 2019. «Wider den Mehrwert! Argumente gegen einen überflüssigen Begriff». In *Routenplaner #DigitaleBildung. Auf dem Weg zu zeitgemäßem Lernen. Eine Orientierungshilfe im digitalen Wandel*, herausgegeben von Axel Krommer, Martin Lindner, Dejan Mihajlovic, Jöran Muuß-Merholz, und Philippe Wampfler, 115–23. Hamburg: ZLL21.
- Kurz, Andrea, Constanze Stockhammer, Susanne Fuchs, und Dieter Meinhard. 2007. «Das problemzentrierte Interview». In *Qualitative Marktforschung*, herausgegeben von Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller, 463–75. Wiesbaden: Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9258-1_29.
- Lauer, Luisa, Kristin Altmeyer, Sarah Malone, Michael Barz, Roland Brünken, Daniel Sonntag, und Markus Peschel. 2021. «Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children». *Sensors*, 21(19), 6623. <https://doi.org/10.3390/s21196623>.
- Lauer, Luisa, und Markus Peschel. 2020. «Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen mit Augmented Reality (AR)». In *Fachliche Bildung und digitale Transformation – Fachdidaktische Forschung und Diskurse. Fachtagung der Gesellschaft für Fachdidaktik 2020*, herausgegeben von Christian Maurer, Karsten Rincke, und Michael Hemmer, 64–67. Regensburg: pedocs. https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=21659.

- Lauer, Luisa, und Markus Peschel. 2022. «Praxisideen für Augmented Reality (AR) im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht». In *Digitales Lernen in der Grundschule III*, herausgegeben von Birgit Brandt, Leena Bröll, und Henriette Dausend, 226–237. Münster: Waxmann.
- Lauer, Luisa, und Markus Peschel. 2023 i.V. «Usefulness von Augmented Reality – eine Modellierung zum fach-medien-didaktischen Potenzial digitaler Medien im Sachunterricht». *GDSU-Journal* (eingereicht).
- Lauer, Luisa, Markus Peschel, Hamraz Javaheri, Paul Lukowicz, Kristin Altmeyer, Sarah Malone, und Roland Brünken. 2022. «Augmented Reality-Toolkit for Real-Time Visualization of Electrical Circuit Schematics». In *Fostering Scientific Citizenship in an uncertain world – ESERA 2021 e-Proceedings*.
- Loosen, Wiebke. 2014. «Das Leitfadeninterview – eine unterschätzte Methode». In *Handbuch nicht standardisierte Methoden in der Kommunikationswissenschaft*, herausgegeben von Stefanie Averbek-Lietz und Michael Meyen, 1–15. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05723-7_9-1.
- Mayring, Philipp, und Thomas Fenzl. 2019. «Qualitative Inhaltsanalyse». In *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, herausgegeben von Nina Baur, und Jörg Blasius, 633–48. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4_42.
- Milgram, Paul, und Fumio Kishino. 1994. «A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays». *IEICE Transactions on Information Systems* E77-D (12). http://vered.rose.utoronto.ca/people/paul_dir/IEICE94/ieice.html.
- Milgram, Paul, Haruo Takemura, Akira Utsumi, und Fumio Kishino. 1995. «Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum», herausgegeben von Hari Das. *Telem manipulator and Telepresence Technologies*. Proceedings Volume 2351 (Dezember): 282–92. <https://doi.org/10.1117/12.197321>.
- Muñoz-Cristóbal, Juan A., Ivan M. Jorrin-Abellan, Juan I. Asensio-Perez, Alejandra Martinez-Mones, Luis P. Prieto, und Yannis Dimitriadis. 2015. «Supporting Teacher Orchestration in Ubiquitous Learning Environments: A Study in Primary Education». *IEEE Transactions on Learning Technologies* 8 (1): 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>.
- Myllymäki, Mikko. 2019. «Paramedic Students' Perceptions on the Technical and Pedagogical Usability of a Virtual Reality Simulation». https://www.researchgate.net/publication/333844710_Paramedic_students%27_perceptions_on_the_technical_and_pedagogical_usability_of_a_virtual_reality_simulation.
- Nielsen, Jakob. 1993. *Usability Engineering*. San Diego, CA; USA: Academic Press.
- Nokelainen, Petri. 2005. «The Technical and Pedagogical Usability Criteria for Digital Learning Material». In *Proceedings of ED-MEDIA 2005--World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*, 1011–16. Waynesville, NC: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). <https://www.learnlib.org/p/20212/>.
- Nokelainen, Petri. 2006. «An empirical assessment of pedagogical usability criteria for digital learning material with elementary school students». *Educational Technology & Society* 9 (2): 178–97.

- Peschel, Markus. 2007. «Konzeption einer Studie zu den Lehrvoraussetzungen und dem Professionswissen von Lehrenden im Sachunterricht der Grundschule – Das Projekt SUN». In *Kompetenzerwerb im Sachunterricht fördern und erfassen*, herausgegeben von Roland Lauterbach, Andreas Hartinger, Bernd Feige, und Diethard Cech, 17: 151–60. Probleme und Perspektiven des Sachunterrichts. Bad Heilbrunn: Klinkhardt. https://www.pedocs.de/volltexte/2017/15054/pdf/PPS_17.pdf#page=151.
- Petko, Dominik, und Beat Döbeli Honegger. 2011. «Digitale Medien in der schweizerischen Lehrerinnen- und Lehrerbildung: Hintergründe, Ansätze und Perspektiven». *Beiträge zur Lehrerbildung* 29 (2): 155–71. <https://doi.org/10.25656/01:13775>.
- Pinho, Andrés Luis Santos, Francisco Monteiro Sales Junior, Jose Guilherme Santa Rosa, und Maria Altina Silva Ramos. 2015. «Technical and pedagogical usability in a virtual learning environment: A case study at the Federal Institute of Rio Grande do Norte — Brazil». In *2015 10th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1–4. Aveiro: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CISTI.2015.7170444>.
- Prieto, Luis P., Martina Holenko Dlab, Israel Gutiérrez, Mahmoud Abdulwahed, und Walid Balid. 2011. «Orchestrating technology enhanced learning: a literature review and a conceptual framework». *Int. J. Technology Enhanced Learning* 3 (6): 583–98. <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2011.045449>.
- Puentedura, Ruben R. 2015. «SAMR: A Brief Introduction». http://hippasus.com/rrpweblog/archives/2015/10/SAMR_ABriefIntro.pdf.
- Purchase, Helen. 1998. «Defining multimedia». *IEEE Multimedia* 5 (1): 8–15. <https://doi.org/10.1109/93.664737>.
- Radu, Iulian. 2014. «Augmented Reality in Education: A Meta-Review and Cross-Media Analysis». *Personal and Ubiquitous Computing* 18 (6): 1533–43. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>.
- Radu, Iulian, und Blair MacIntyre. 2012. «Using children's developmental psychology to guide augmented-reality design and usability». In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 227–236. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402561>.
- Radu, Iulian, und Bertrand Schneider. 2019. «What Can We Learn from Augmented Reality (AR)?: Benefits and Drawbacks of AR for Inquiry-Based Learning of Physics». In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. Glasgow Scotland Uk: ACM. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300774>.
- Ritchie, Stephen. 2006. «Ethical Considerations for Teacher-Education Researchers of Coteaching». *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research* 7 (4), Art. 21. <https://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/view/186/413>.
- Sales Junior, Francisco Monteiro, Altina Ramos, Andrés Luis Santos Pinho, und José Guilherme Santa Rosa. 2016. «Pedagogical Usability: A theoretical essay for e-learning». *HOLOS* 32 (1): 3–15. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.2593>.
- Schnotz, Wolfgang, und Maria Bannert. 2003. «Construction and Interference in Learning from Multiple Representation». *Learning and Instruction* 13 (2): 141–56. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8).

- Schweiger, Moritz, Jeffrey Wimmer, Maiyra Chaudhry, Beatriz Alves Siegle, und Dianchu Xie. 2022. «Lernerfolg in der Schule durch Augmented und Virtual Reality?: Eine quantitative Synopse von Wirkungsstudien zum Einsatz virtueller Realitäten in Grund- und weiterführenden Schulen». *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 47 (April): 1–25. <https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.01.X>.
- Silius, Kirsi, und Anne-Maritta Tervakari. 2003. «An Evaluation of the Usefulness of Web-Based Learning Environments – The Evaluation Tool into the Portal of Finnish Virtual University». http://www.mit.jyu.fi/OPE/kurssit/TIES462/Materiaalit/Silius_Tervakari.pdf.
- Silius, Kirsi, Anne-Maritta Tervakari, und Seppo Pohjolainen. 2013. «A multidisciplinary tool for the evaluation of usability, pedagogical usability, accessibility and informational quality of Web-based courses». <https://www.researchgate.net/publication/228603493>.
- Thees, Michael, Sebastian Kapp, Martin P. Strzys, Fabian Beil, Paul Lukowicz, und Jochen Kuhn. 2020. «Effects of Augmented Reality on Learning and Cognitive Load in University Physics Laboratory Courses». *Computers in Human Behavior* 108 (Juli): 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>.
- 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>.
- Weinberger, Armin. 2018. «Orchestrierungsmodelle und -szenarien technologieunterstützten Lernens». In *Digitalisierung und Bildung*, herausgegeben von Silke Ladel, Julia Knopf, und Armin Weinberger, 117–39. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18333-2_7.
- Winther, Esther, Jessica Paeßens, Monika Tröster, und Beate Bowien-Jansen. 2022. «Immersives Lernen für Geringliteralisierte: Chancen der Augmented Reality am Beispiel der Finanziellen Grundbildung». *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 47 (April): 267–87. <https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.13.X>.
- Wyss, Corinne, Florian Furrer, Adrian Degonda, und Wolfgang Bühner. 2022. «Augmented Reality in der Hochschullehre: Überlegungen zu einer zukunftsweisenden Ausbildung von Lehrpersonen». *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 47 (April): 118–37. <https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.06.X>.
- Zurita, Gustavo, Nelson Baloian, Sergio Peñafiel, und Oscar Jerez. 2019. «Applying Pedagogical Usability for Designing a Mobile Learning Application That Support Reading Comprehension». *Proceedings* 31 (1): 6. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019031006>.

Hinweise und Erklärungen

Die beschriebene Studie wird im Rahmen des Projekts GeAR vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderlinie «Digitalisierung im Bildungsbereich II», FKZ: 01JD1811A bzw. 01JD1811C) finanziert.

Alle Teilnehmenden erteilten ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme an der Studie und zur Erhebung, Speicherung und Verwendung der erhobenen Daten zu Forschungszwecken sowie zur anonymisierten Veröffentlichung der Forschungsergebnisse. Die Studien im Rahmen des Projekts GeAR wurden durch die institutionelle Ethik-Kommission genehmigt. Autorin und Autor erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Wir danken der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Paul Lukowicz des DFKI Kaiserslautern für die technische Entwicklung des im Rahmen dieser Studie verwendeten AR-Lehr-Lern-Tools.

Anhang

Weitere Materialien (detaillierter Codier-Leitfaden, tabellarische Einzelfall-Übersichten, MAXQDA-Dateien, Interview-Leitfaden, Vorab-Befragung für Teilnehmende, Videos zum AR-Lehr-Lern-Tool) sind verfügbar via OSF: https://osf.io/r27ue/?view_only=56ac0f543d734aa68991e21f738aae5e0

E_Student Control
1 Bedienbarkeit / Kontrollierbarkeit
1.1 Motorische und haptische Bedienbarkeit durch die Lernenden
«B: Ich könnte mir auch vorstellen, dass die Kinder damit auch (sicher?) umgehen, wenn man ihnen das auch sagt, weil das auch immer so das, oh kann ich jetzt so einem Kind das Tablet anvertrauen oder wie geht es damit um ...» (Jade, 25)
1.2 Kognitive Bedienbarkeit des AR-Tools durch die Lernenden
«B: [...] also ich denke, dass da sehr viele Kinder jetzt auch Tablets bedienen können, die das vorher vielleicht nur für Spiele oder so genutzt haben» (Kira, 18)
2 Unterstützung / Betreuung
2.1 Anleitung / Einweisung: Notwendige Anleitung/Einweisung der Lernenden im Umgang mit dem AR-Tool betreffen durch die Lehrperson
«B: Bei der Brille selbst gut klar, da muss auf jedes Kind dann persönlich nochmal eingestellt werden. Das stelle ich mir schon sehr aufwändig vor, wenn Sie das bei 28 Kindern oder so machen zu müssen» (Lena, 36)
2.2 Reglementierung des Umgangs mit dem AR-Tool für die Lernenden durch die Lehrperson
«B: [...] Erst muss man mal Regeln erarbeiten, wie man damit umgeht und gut, wenn dann jeder das verstanden hat erstmal einen ausprobieren natürlich und dann nachher gezielt Dinge raussuchen, die man dann auch ausprobieren möchte.» (Kim, 4)

E_Student Activity
1 Ausprobieren: Ermöglichung des freien Ausprobierens durch die Lernenden beim Umgang mit dem AR-Tool
1.1 Ausprobieren Bauteile: Freies Ausprobieren mit den physischen Bauteilen durch die Lernenden beim Umgang mit dem AR-Tool
«B: [...] Sie werden versuchen, was man alles miteinander verbinden kann, wie man das einbauen muss, wo der Schalter hin muss.» (Bea, 10)
1.2 Ausprobieren AR: Freies Ausprobieren (bzgl. der Interaktion) in AR durch die Lernenden beim Umgang mit dem AR-Tool
«B: [...] Und ansonsten würden die, glaube ich, wenn es da irgendwas zu tippen gibt an den Brillen, würden die da auf jeden Fall herumtippen.» (Jade, 39)
2 «Versinken» der Lernenden in die Beschäftigung mit dem AR-Tool
«B: [...] Aber ich glaube, wenn ich etwas hätte, was super funktionieren würde, könnte ich mich in dieser Technik auch verlieren [...] und hier könnte ich mir auch gut vorstellen, dass wenn man mal dran ist und das klappt gut und ah da ist das Bild und jetzt probiere ich das noch aus, dass man die Zeit darüber vergisst.» (Frank, 2)
E_Collaborative Cooperative Learning
1 Soziale Aspekte und Implikationen des Zusammenarbeitens mit dem AR-Tool
1.1 Rollenverteilung oder -zuweisung unter den Lernenden während des Zusammenarbeitens mit dem AR-Tool
«B: [...] man muss vielleicht klären, wer ist für was zuständig, man muss eine Strategie sich gemeinsam im Vorfeld überlegen.» (Freddie, 14)
1.2 Gegenseitiger Profit: Gegenseitiges Profitieren der Lernenden voneinander während des Zusammenarbeitens mit dem AR-Tool
«B: [...] Die werden natürlich schon so ein bisschen nach links und rechts schauen, was machen die anderen, was kann ich hier tun, [...] und so profitieren ja auch die, ich sage mal die Pfißigeren von den anderen und auch umgekehrt [...]» (Chris, 79)
2 Technische Zusammenarbeit mit dem AR-Tool
2.1 Gemeinsame Nutzung des AR-Tools während des Zusammenarbeitens
2.1.1 Gemeinsame Nutzung der Bauteile
«B: [...] Und von daher, dass da jedes Kind jetzt für sich ein eigenes braucht, ich würde mal sagen (...), paar, die kleinste Einheit wäre in dieser Sache die Bank, also der Partner und ich [...]» (Jack, 64)
2.1.2 Gemeinsame Nutzung der AR-Geräte
«B: [...] und dann müssen die Kinder sich natürlich auch immer in einer Vierer-, Fünfergruppe dann halt nochmal andere Lösungen dann überlegen, bis dann halt auch jeder, der interessiert daran ist, das durch die Brille zu sehen, dass er auch die Möglichkeit dazu hat.» (Nena, 26)

E_Guidance to Purposes
1 Überfachliche Kompetenzen: Anbahnung überfachlicher Kompetenzen mithilfe des AR-Tools
1.1 Verbalisierung von Sachverhalten / Vorgängen
«B: [...] das lässt sich natürlich auch später ganz gut dazu nutzen gemeinsam beobachtete und initiierte Prozesse dann halt auch in der richtigen Reihenfolge zu versprachlichen.» (Nena, 62)
2 Naturwissenschaftsbezogene Kompetenzen: Anbahnung naturwissenschaftsspezifischer Kompetenzen mithilfe des AR-Tools
2.1 Naturwissenschaftliches Experimentieren
«B: [...] dass man dann überlegt, wie war es und vorher auch eine Einschätzung vielleicht Vermutung, was wird passieren und auch ähnlich wie bei den Experimenten denke ich.» (Kim, 4)
2.2 Verwendung symbolischer Darstellungen
«B: [...] Genau also im Unterricht könnte ich es mir die Dreidimensionalität von Objekten beziehungsweise das, was Sie hier jetzt getan haben, Zeichen zu ordnen an Objekten, vorstellen.» (Freddie, 34)
3 Fachzuordnung
3.1 Physik
«B: Also ich kann es mir vor allen Dingen natürlich aus dem Bereich der Physik natürlich sehr gut vorstellen.» (Freddie, 32)
3.2 Sachunterricht
«B: Also auf jeden Fall im Sachunterricht[...].» (Lena, 28)
4 Kompetenzen im Themenfeld Elektrik
4.1 Elektrische Schaltungen
4.1.1 Komponenten / Bauteile elektrischer Schaltungen
«B: [...] Sie können natürlich die Funktionen der verschiedenen Bestandteile des Stromkreises experimentell ausprobieren.» (Freddie, 10)
4.1.2 Funktionsweise elektrischer Schaltungen
«B: [...] Sie könnten feststellen, dass ein Stromkreis ohne Energie nicht funktioniert, dass ein Schalter dazu da ist, an und aus zu gehen [...] und dass dann die Verbindung der einzelnen Teile durch Kabel hergestellt werden muss.» (Freddie, 10)
4.2 Symbolische Repräsentationen
4.2.1 Symbole von Komponenten / Bauteilen elektrischer Schaltungen
«B: [...] ich könnte das auch extra dann fragen und sagen, oh schau mal, wenn ihr die Brille anzieht, da kommen ja Zeichen. Finde heraus, welches Zeichen für welche benutzt wird, für welchen Gegenstand.» (Bruno, 107)
4.2.2 Symboliken von elektrischen Schaltungen
«B: [...] oder was die Kinder da dran lernen könnten, sind Schaltpläne.» (Bea, 20)

E_Applicability
1 (Generelle) Anwendbarkeit des AR-Tools in der Grundschule
1.1 Klassenstufe: (Einschränkung der) Anwendbarkeit des AR-Tools für bestimmte Klassenstufen
«B: [...] ab der dritten Klasse – auch da wieder nach Leistungsstand oder nach Interessenstand der Kinder – vielleicht eher angebracht ab drittem Schuljahr, zweite Hälfte bis zum vierten Schuljahr.» (Frank, 32)
1.2 Physische Passung: Physische (haptische, motorische) Anwendbarkeit des AR-Tools (insb. der Umgang mit den Bauteilen)
«B: Also ich glaube, das Unförmige, was Sie jetzt angesprochen haben, das ist grundsätzlich erstmal gar nicht das Problem, denn die Grundschul Kinder sind im Grunde genommen ganz gern was, was so, haptisch, so anfassbar ist und so [...]» (Nena, 6)
1.3 Kognitive Belastung: Anwendbarkeit des AR-Tools bzgl. der kognitiven (Belastungs-) Fähigkeiten von Grundschulkindern
«B: So etwas gibt es hier nicht. Also, dass ein Kind hier nicht weiterkommt, das geht hier nicht, also mit diesem System nicht.
I: Alles klar.
B: Also selbst mein lernbehindertes Kind würde das irgendwie so lange zusammenstecken, bis es funktioniert.» (Bruno, 193–195)
2 Differenzierungsmöglichkeiten durch den Einsatz des AR-Tools
2.1 Fachliches Leistungsniveau: Differenzierungsmöglichkeiten bzgl. Unterschieden im fachlichen Leistungsniveau der Lernenden
«B: [...] ich kann mir natürlich vorstellen, dass man dann halt gewisse Teile zum Beispiel weglässt und leistungsschwächeren Schülern einfach nur drei Komponenten gibt, statt hier sechs oder sieben Komponenten zu geben, sodass die im Kleinen anfangen und den Stromkreis dann weiter erweitern könnten.» (Freddie, 44)
2.2 Sprachliches Niveau: Differenzierungsmöglichkeiten bzgl. Unterschieden im sprachlichen Niveau der Lernenden
«B: [...] Also wenn ich jetzt an meine Migrationskinder denke, die vielleicht von den Erzählungen her wenig verstehen oder weniger verstehen, denke ich, hätten sie darüber noch mal einen anderen Zugang [...] auch wenn sie jetzt die Begriffe nicht direkt kennen, aber über die Symbole schaffen sie das.» (Frank, 14)
E_Added Value
1 Darbietung von Lerninhalten: Vorzüge des AR-Tools gegenüber einer Non-AR-Version, die die Darbietung von Lerninhalten betreffen
1.1 Verschränkung von Objekt und zugehöriger symbolischer Repräsentation
«B: [...] Also den Mehrwert sehe ich tatsächlich darin, dass es, dass es sehr konkret die praktische Verbindung zur Theorie gibt. Es ist ganz augenscheinlich, es wird ein direkter Bezug hergestellt und dieser Schritt sage ich mal, vom Experimentieren auf dem Tisch und das dann händisch anbringen an die Tafel oder an Smartboard oder wie auch immer, der wird hier ja sehr, sehr reduziert. Das heißt, es ist sehr, sehr nahe am Geschehen dran und ich glaube von daher auch deutlich verständlicher. Oder sehr verständlich für die Schüler in der direkten Zuordnung was, was ist.» (Freddie, 54)

1.2 Losgelöstheit von gesprochener Sprache
«B: [...] Also jeder, dass es halt in jeder Gruppe das ist, was er machen kann und das Coole bei dem Stromkreis sind ja die Symbole, das ist ja sprachunabhängig, das kann man ja, das ist ja wie Mathe. Da kann man ja auch glänzen, wenn man kein Deutsch kann, von daher.» (Jack, 51)
2 Technische Besonderheiten: Vorzüge des AR-Tools gegenüber einer Non-AR-Version, die technische Charakteristika betreffen
2.1 Ergebnissicherung in AR
«B: [...] wenn du den Kindern sagst, jetzt mach mal einen Stromkreis, male das mal in dein Heft und dann sieht das Kind das da, und dann kann das das ja theoretisch quasi vom iPad abzeichnen mit seinem Kollegen.
I: Ja, auf jeden Fall.
B: Also das ist halt schon ganz geil.» (Jack, 1-3)
3 Arbeits- und Betreuungsformen: Vorzüge des AR-Tools gegenüber einer Non-AR-Version, die die potenziellen Arbeits- bzw. Betreuungsformen und -möglichkeiten betreffen
3.1 Erleichterung von Organisation und Betreuung durch die Lehrperson
3.1.1 Entlastung der Lehrperson bzgl. Betreuungsaufwand
«B: [...] Aber so an sich ist das ultimative Feedback in Sekundenschnelle, das kann ich als Lehrer gar nicht leisten, und das ist halt das was mir Entlastung verschafft und einfach, würde ich sagen, das Arbeiten effektiver macht.» (Jack, 70)
3.1.2 Remote-Betreuung (auch von zu Hause aus, z. B. Quarantänefälle) für Lernende
«B: [...] Und halt wie gesagt, vielleicht auch wenn ein Kind mal krank ist. Also ich weiss nicht, inwieweit das halt geht oder, was weiss ich, in Quarantäne muss oder solche Sachen halt, dann könnte ich mir schon vorstellen, [...] dass man sich dann zu dem Kind dann irgendwie dazuschalten kann, wenn es da irgendwie Probleme gibt [...]» (Jade, 25)
3.2 Rückzugsmöglichkeit AR-Gerät
«B: [...] Ich glaube, dass die eher über so etwas herangeführt werden könnten, weil auch dann in dem Moment niemand zuschaut, was sie machen. [...] Der Nachbar rechts und links sieht: ich Kabel da rum, ich stöpsle falsch, oh Gott der kommt nicht klar, die Rückmeldung von den Mitschülern ist natürlich viel direkter und mit der Brille bin ich für mich, da kann ich in meinem Tempo arbeiten, ich habe auch nicht den Stress oh Gott wie weit ist der und der, ich mache einfach nach meinem Tempo und nach meinem Verständnis da weiter.» (Frank, 12)
4 Kein Mehrwert: Aussagen, die darauf schliessen lassen, dass das AR-Tool keinen Mehrwert gegenüber einer Non-AR-Version hat
«B: Ja aber jetzt einen Mehrwert gegenüber den Kästen, die wir haben oder den Materialien die wir haben (... überlegt) kann ich jetzt so auf ad-hoc nicht erkennen.» (Bea, 58).
«B: Also was ich, also was ich auf, also was sich </>, also ich meine Experimentieren machen die Kinder auf jeden Fall gerne, egal ob so oder so (...). Ich glaube im Prinzip sind es ja, ist es ja eigentlich das Gleiche, also ob wir jetzt so einen Stromkreis aufbauen und das an die Tafel malen oder ob die Kinder das halt so bauen und mit den Brillen sehen.» (Jade, 43)

E_Motivation
1 Intrinsic Motivation: Beeinflussung der intrinsischen Motivation (insb. Spass an der Sache selbst) der Lernenden durch das AR-Tool
1.1 Lernerfolg: Beeinflussung der Erinnerungsfähigkeit oder -dauer oder den Lernerfolg der Lernenden bzgl. der durch das AR-Tool angebahnten Kompetenzen wegen erhöhter intrinsischer Motivation
«B: Also ich denke dadurch, dass die Motivation bei sowas mit einer Brille wesentlich höher ist, behalten sich die Kinder das auch länger. Dass sie wirklich auch mehr lernen, als wenn sie den klassischen Stromkreis herstellen.» (Freddie, 48)
1.2 Beschäftigungsdauer: Beeinflussung der Beschäftigungsdauer der Lernenden mit dem AR-Tool wegen erhöhter intrinsischer Motivation
«I: Ok. Könnten Sie sich vorstellen, dass also sozusagen alleine schon der Einsatz von dieser Technik und diesen Entwicklungen alleine schon dazu beiträgt, dass die Kinder sich zum Beispiel länger mit dem Sachlichen beschäftigen?
B: Ja, also absolut. Das ist ganz klar. Zumal sie im Prinzip den gleichen Unterrichtsinhalt ja immer noch steigern können.» (Freddie, 59–60)
1.3 Initialmotivation
1.3.1 Anfängliche Hype-Situation mit immensem Spassfaktor
«B: Der Spassfaktor ist gigantisch.
I: Auch jetzt so gegenüber der Ottonormalsituation.
B: Immer.» (Bruno, 165–167)
1.3.2 Nachlassender Effekt: Nachlassen der Initialmotivation mit der Zeit
«B: [...] wie lange das dann hält, ich meine irgendwann können sie alles und wenn es dann darum geht, das dann auch irgendwie zu lernen oder was weiss ich, dann könnte vielleicht das auch nochmal nachlassen, aber am Anfang denke ich schon, dass es gross ist.» (Freddie, 55)
1.4 Ursache: Aspekte, die die Ursache der hervorgerufenen intrinsischen Motivation beschreiben
1.4.1 Thema Elektrik / Schaltungen
«B: Also ich glaube, es ist immer cool für die Kinder, wenn sie irgendwas mit ihren Händen machen können, ja wenn sie einen Stromkreis bauen und dann auf einmal merken, ja ok, wenn das hier alles geschlossen wurde, leuchtet das Licht, warum ist das so? [...] Das ist halt immer so ein bisschen schwierig, aber grundsätzlich denke ich, dass sowas die Kinder generell immer sehr motiviert.» (Jade, 61)
1.4.2 AR-Technologie
«B: [...] die ganze Technik, Augmented Reality, super spannend. Kann mir super vorstellen, dass das wirklich auch Spass macht, also das ist ja das Beste, die beste Sache, wenn man sagen kann Lernen macht Spass, und ja [...]» (Chris, 4)
E_Valuation of Prior Knowledge
1 Vorwissen aus dem Alltag, an das das AR-Tool anknüpfen kann
«B: Was die Kinder mitbringen sind ja zunächst mal Alltagserfahrungen, [...] alle Kinder haben schon einmal auf einen Lichtschalter getippt, sofern es die in 10, 15 Jahren noch gibt, ich gehe aber davon aus, ja.» (Nena, 66)

2 Technisches Vorwissen, an das das AR-Tool anknüpfen kann / muss
2.1 Software-Bedienung
«B: Also das heisst, es muss jemanden geben, [...] der die Einstellungen vornehmen kann.» (Freddie, 14)
2.2 Hardware-Bedienung
2.2.1 AR-Brille
«B: [...] Klar, schonmal mit dem Umgang mit den Brillen alles natürlich erklären und ausprobieren lassen» (Lena, 6)
2.2.2 Tablet
«B: Gut je nachdem, wenn sie jetzt noch mit Tablets dazu arbeiten. Bisschen Umgang brauchen sie ja auf jeden Fall, aber ich denke, das haben die Kinder sowieso schon mittlerweile, dass sie sich da schon gut klarkommen.» (Lena, 34)
3 Fachliches Vorwissen, an das das AR-Tool anknüpfen kann / muss
3.1 Vorwissen zu Symbolen
«B: Die Kinder müssen natürlich verstehen, was Symbole sind.» (Bruno, 107)
3.2 Vorwissen zum Thema Elektrizität
3.2.1 Elektrischer Strom
«B: [...] Klar, dass sie wissen was Strom überhaupt ist, sollte man vorher schon behandelt haben.» (Lena, 32)
3.2.2 Elektrische Komponenten / Bauteile
«B: [...] also ich muss schon vorher mit denen besprechen, was ich mit den einzelnen Teilen hier machen kann.» (Bea, 26)
3.2.3 Elektrische Schaltungen (Aufbau und Funktionsweise)
«B: Ja gut, [...] müsste man natürlich einen Führerschein am besten machen, also einführen, das würde ich jetzt nicht so frei hingeben, sondern das mit der Batterie [Kurzschluss, eigene Einfügung] darf natürlich nicht passieren.» (Bruno, 44)
E_Flexibility
1 Verfügbarkeit verschiedener Lösungswege beim Bauen der Schaltungen mit dem AR-Tool
«B: Die probieren erstmal alles Mögliche aus. [...] Weil von den Kindern aus kommt ja auch viel und die sollen ja auch ihre Ideen dann mal einbringen und entdecken, dass auf einmal etwas klappt und vorher nicht und dann mal gucken warum.» (Kim, 12)
2 Begrenztheit der Art oder Anzahl möglicher «Lösungswege» beim Bauen der Schaltungen mit dem AR-Tool
«B: [...] Na gut der Rahmen ist abgesteckt, man kann einen Stromkreis machen mit Schalter, Batterie und Lampe, insofern bleibt ja in der Beziehung nicht viel Spielraum.» (Max, 22)
E_Feedback
1 Echtzeit-Feedback zu Aktionen der Lernenden durch die AR-Anwendung
1.1 Feedback beim Hinzufügen von Komponenten zur Schaltung
«B: Also die Rückmeldung kommt ja direkt. [...] Sobald man es zusammensteckt, kommt ja die Rückmeldung. [...] Alles eindeutig. Auch die Zeichen, die dann direkt kommen.» (Lena, 52)

1.2 Feedback zum aktuellen Status der Schaltung
«B: Es wird natürlich die Rückmeldung erhalten, wann ist der Schaltkreis geschlossen.
I: Okay. Ja, das ist ja quasi die Anzeige.
B: Ja, weil vorher, egal, egal, was ich vorher zusammen mache, das ist ja immer in einer Linie und erst wenn ich wirklich den Schaltkreis geschlossen habe mit allem Wesentlichen, dann geht es zu.» (Bruno, 189–191)
Tab. A2: Kategoriensystem «Zukünftige Entwicklungen» mit Ankerbeispielen
Z_ Student Control
1 Kontrolleinschränkung: Vorschläge, die die Einschränkungen der Kontrolle des AR-Tools durch die Lernenden betreffen
1.1 Verhinderung externer Aktivitäten von Lernenden (ausserhalb der eigentlichen Anwendung) auf dem AR-Gerät
«B: Ja gut, so prinzipiell wäre es halt gut, wenn ich gebe irgendeinen Auftrag und die Kinder können da ansonsten aber auch nichts machen, also die können da nichts verstellen oder da irgendeinen Quatsch machen oder so.» (Jade, 31)
1.2 Anhalte-Funktion: «Einfrieren» der AR-Anwendung durch die Lehrperson
«B: [...] und ich fände es auch wirklich noch wichtig, dass man als Lehrer so einfach vielleicht so eine Sperrfunktion eben hat, ne, also dass man sagt, okay bis hier hin und dann geht es erstmal nicht weiter [...].» (Jade, 59)
2 Wahl der Input-Kanäle: Vorschläge, die die Wahl der Input-Kanäle in AR (z. B. nur Realität, nur Virtualität, beides gleichzeitig) betreffen
«B: [...] Vielleicht variieren, dass man selbst einstellen könnte, also man sieht ja hier immer noch den ganzen anderen Hintergrund, dass man eben den Hintergrund einblenden und ausblenden kann, weil ich mir vorstellen kann, dass das eben für manche Kinder zu viele Reize sind, wenn die alles noch rundherum sehen, also das, was weiss ich, ob das dann ein schwarzer Hintergrund ist oder wie auch immer aber dass es dann einfach nur noch fokussiert wäre auf die paar Sachen, die man so sieht, aber dass man selbst variieren kann, natürlich ist das ganz witzig, wenn das einfach so im Raum rumfliegt, aber bei manchen ist es vielleicht einfacher, wenn man es kleinhält.» (Hope, 82)
3 Interaktivität: Vorschläge, die Interaktivität in AR betreffen
«B: [...] Ja interessant wäre natürlich, dass man diese Sachen auf der Brille hat und jetzt ,sagen wir mal, das Schaltersymbol irgendwo und das dann eben nochmal irgendwo zuordnet. Dieses interaktive, was ich vorhin gesagt habe, dass man diesen Schalter oder sowas zuordnet.» (Bea, 52)
Z_Collaborative Cooperative Learning
1 Ansicht teilen: Vorschläge, die das Teilen der Sicht in AR betreffen
1.1 Ansicht individuell (zwischen zwei Personen) teilen
«B: Also jemand sagt «so pass auf ich zeige euch jetzt mal, was ich mit der Brille sehe und stelle mir meine Version vor», dann gibt man das an Brille Nummer zwei weiter, dann hat man die Einstellung, Brille Nummer drei, Brille Nummer vier.» (Freddie, 22)

1.2 Ansicht im Plenum teilen
«B: Also das, für die VISUALISIERUNG, für die Klasse, wenn ich das meinetwegen, die Kinder haben so ein iPad und ich würde dann das iPad von der Gruppe sharen und auf den Screen schmeissen, dann würden die anderen direkt sehen, wie es richtig ist.» (Jack, 9)
2 Überblicksansicht für Lehrende über alle aktiven AR-Ansichten aller Lernenden
«B: Und wie sieht der Lehrer, wie welches Kind arbeitet? Gibt es da so eine Art Schaltzentrale wo der Lehrer dann einen Überblick hat, wenn was man macht?
I: Ja, es gibt die Möglichkeit, sich über einen PC mit der Brille zu verbinden [...].
B: Super, wo man noch einen kleinen Tipp geben könnte.» (Kim, 50–52)
Z_Guidance to Purposes
1 Transparenz bzgl. Lerngegenstand / -ziel: Vorschläge, die Transparenz bzgl. des intendierten Lerngegenstands / der intendierten Lernziele für die Lernenden betreffen
«B: Wenn die fünf Lernfelder abgearbeitet sind, kriegt der Schüler eine entsprechende digitale Rückmeldung, dann was ich eben gesagt habe. Mit Icons oder keine Ahnung, wie auch immer. Das heisst, dass innerhalb dieses Lernfeldes, dieser Lerneinheit dann eine digitale Bestätigung erfolgt, statt vom Lehrer.» (Freddie, 72)
2 Bezug zum Thema «Schaltungen» bzw. «Schaltsymboliken»: Vorschläge, die die Verdeutlichung des Bezugs zum Thema «Schaltsymboliken» für die Lernenden betreffen
2.1 Ebene der Komponenten / Bauteile
«B: Jaja nein, das ist </> und auch wirklich vielleicht ganz simpel halten, dass es wirklich noch ursprünglich ist. Am besten für die Kinder wäre, (unverständlich) mit reinschauen, dass am besten noch hinten so etwas auf wäre, dass man die DRÄHTE SIEHT. Dass man sieht, was sich darin abspielt, das wäre halt sehr cool.» (Jack, 41)
2.2 Ebene der AR-Symboliken
«B: In dem man dann </> also zum Beispiel bei der Schaltung nicht nur sieht <aha der Schalter ist auf oder zu>, sondern man müsste dann auch konkret sehen, auch digital, leuchtet das Lämpchen jetzt oder leuchtet das Lämpchen nicht.» (Freddie, 66)
Z_Applicability
1 Komplexität der Schaltung: Vorschläge, die auf die Variation der Komplexität der zu bauenden Schaltungen abzielen
1.1 Anzahl der Komponenten / Bauteile
«B: Da gibt es vielleicht auch irgendwie verschiedene, vielleicht durch die Anzahlen der, der Sachen, gibt es vielleicht verschiedene Möglichkeiten, dass man dann irgendwie komplexere, grössere Pläne zeigt.» (Kira, 60)
1.2 Art der Schaltung
«I: Okay, hätten Sie da noch eine Idee, wie man das für die stärkeren Kinder noch ein bisschen herausfordernder machen könnte?
B: Klar, ich meine, da fehlt ja jetzt noch Parallelschaltung, mehrere Glühbirnen hintereinander [...].» (Bruno, 134–135)
2 Sprachliche / begriffliche Ergänzungen: Vorschläge, die auf die (optionale) Ergänzung von Fachbegriffen abzielen

2.1 Visuelle Ergänzungen
«B: Oder dass man die Möglichkeit zumindest hat, das Wort ein- und auszublenden, das wäre auch eine Möglichkeit.» (Max, 5)
2.2 Akustische Ergänzungen
«B: Also die Kinder mit Migrationshintergrund, die bräuchten bei der Sicht auf die Symbole im Prinzip das gesprochene Wort dazu [...].» (Frank, 44)
3 Repräsentationen: Vorschläge, die auf die (Variation der) wahrnehmbaren Repräsentationen abzielen
3.1 Förderung der Kohärenz zwischen realen und symbolischen Repräsentationen
«B: Für die schwachen Kinder reichen die Symbole aus, man könnte vielleicht noch sagen man benutzt andere Farben, dass sie über die Farbsymbolik einfach wissen, was weiss ich, der Schalter ist immer blau, also es ist ganz klar, egal was da ist, sobald ich dieses blaue Symbol sehe, das muss der Schalter sein [...].» (Frank, 44)
3.2 Wahlmöglichkeit visualisierter Symboliken in AR
«B: [...] Und das, das ist einerseits eine gute Differenzierungsmöglichkeit, dass ich einem sehr guten Kind sage, du bekommst das da nicht, du musst halt selber, du weisst, du kennst die Symbole, verbinde die selber, wo man das ja auch eventuell noch sagen könnte, je nachdem, wie das Programm geartet ist, dass es da in dem Programm einfach ein Feature gibt, dass es nicht diesen fertigen Plan darstellt.» (Jack, 66)
Z_Added Value
1 Ergebnissicherung in AR: Vorschläge, die auf die Sicherung von Ergebnissen der Arbeit in der AR-Anwendung abzielen
1.1 Export von Ergebnissen: Vorschläge zur Sicherung von Ergebnissen in Form von exportierten und einsehbaren Dateien (Fotos, Videos) zu abgeschlossenen Arbeiten in der AR-Anwendung
«B: [...] Dass man das halt irgendwie, irgendwo festhalten muss, ich weiss ja auch nicht, ob es da irgend so einen Speicher gibt, wo jedes Kind, was weiss ich, eine personalisierte Brille hat.» (Jade, 43–45)
1.2 Wiederaufnahme von Arbeitsständen: Vorschläge zur Sicherung von Arbeitsständen zur Ermöglichung der Wiederaufnahme der Arbeit in der AR-Anwendung bei zukünftiger Nutzung
«B: [...] Wenn jetzt ein Schüler bearbeitet hat, dass der dann nochmal seine Brille bekommt und daran vielleicht weiterarbeiten kann oder etwas verändern kann.
I: Das wäre auf jeden Fall möglich [...]
B: Genau eben ist ja die Zeit rum und vielleicht ist der noch nicht fertig, dass man da nochmal weiterarbeiten kann.» (Kim, 46–48)
2 Visualisierung nicht-beobachtbarer Vorgänge: Vorschläge, die auf die Visualisierung nicht-beobachtbarer Vorgänge in elektrischen Schaltungen auf Teilchenebene in AR abzielen
«B: [...] Ah jetzt haben wir das gemacht und das sind die Elektronen und die laufen jetzt hier wirklich durch die Kabel, dann wäre das ja viel klarer [...] weil die die Abstraktion nicht (sehen) können.» (Bruno, 18)

Z_Valuation of Prior Knowledge
1 Vorwissen aus dem Alltag: Vorschläge, die auf den Bezug zu alltäglichem Vorwissen abzielen
«B: Und ansonsten, also man könnte wahrscheinlich auch irgendwie in, aus dem Alltag irgendwie noch etwas zeigen, wo das Ganze zur Anwendung kommt.» (Kira, 110)
2 Vorwissen zu symbolischen Darstellungen: Vorschläge, die auf den Bezug zu symbolischen Darstellungen (und ihre optische Korrespondenz zu entsprechenden realen Objekten) abzielen
«B: Also besser fände ich dann, wenn die das zusammensetzen, dass das dann genauso auch zusammengesetzt wird, wie sie es hier auch zusammensetzen, dass das noch mehr konform ist, also mehr deckungsgleich.» (Max, 71)
Z_Flexibility
1 Aufgabenvariation: Vorschläge, die auf das Hinzufügen variierbarer Aufgabentypen in AR abzielen
«B: [...] und da kannst du ja meinetwegen auch, man kann ja da auch, könnte man Memory machen, was weiss ich, man gibt das Schaltbild auf, sagt, das ist die Realität, ordne dem unterschiedlichen Setting, ein Schaltbild zu, die Lampe da leuchtet nicht [...]» (Jack, 61)
Z_Feedback
1 Aktionen der Lernenden: Vorschläge, die auf Echtzeit-Feedback zu Aktionen der Lernenden abzielen
1.1 Visuelles Feedback zu Aktionen der Lernenden
«B: Da gibt es ja heute auch schon in Computerprogrammen, in dem Signale auftauchen «das hast du gut gemacht» oder «Prima». Also oder irgendwelche Icons aufleuchten zur Bestätigung der Arbeit von Schülern.» (Freddie, 66)
1.2 Akustisches Feedback zu Aktionen der Lernenden
«B: Dass man die irgendwie Voice Mitteilungen, das hast du jetzt gut zusammengebaut [...]» (Bea, 70)
2 Aktueller Status der Schaltung: Vorschläge, die auf Echtzeit-Feedback zum aktuellen Status der gebauten Schaltung abzielen
2.1 Visuelles Feedback zum aktuellen Status der Schaltung
«B: [...] Dass was aufleuchtet oder sowas. So wie das eben dieses grüne, dass man mit Farben spielt oder sowas. Dass, wenn das falsch verbunden ist, dass es noch rot umrandet ist oder sowas und dann wird es – wirklich zusammenpasst, wenn man richtig verbunden hat – grün oder sowas.» (Bea, 72)
2.2 Akustisches Feedback zum aktuellen Status der Schaltung
«B: [...] ich weiss ja nicht, ob es da so ein, wie so ein Mikro noch gibt, wo man dann zu einem einzelnen Kind, also wir machen jetzt eine Übungsstunde, die Kinder haben die Brille auf und [...] dass man so einen Befehl eingibt, dass das so eine Computerstimme dem Kind halt irgendwie sagt oder so.» (Jade, 51–55)
Tab. A3: Kategoriensystem «Unterschiede Brille – Tablet» mit Ankerbeispielen

U_Student Control
1 Benutzung der AR-Anwendung auf dem Gerät: Unterschiede zwischen der Tablet- und der Brillen-Variante, die die Navigation vor dem Starten der Schaltsymboliken-Anwendung betreffen.
«B: Gut die Brillen natürlich für Kinder angepasst. Das ist ja logisch (lachen). Auch dass sie selbst sich das einstellen können, aber ich denke, das ist schon ganz einfach.» (Lena, 18)
U_Collaborative Cooperative Learning
1 Ansicht teilen: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version, die das Teilen der Sicht in AR betreffen
1.1 Kollaboration: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version bei der Kollaboration von Lernenden
«B: (lachen) Ich frage mich gerade, ob dazu nicht die Brillen dann vernetzt sein müssten. [...] Also dann sage ich mal so, wenn die dann vernetzte Brillen haben, vielleicht kann man dann auch noch einstellen </> ne ja oder vielleicht kann man dann auch eine Brille so einstellen, dass das quasi die Masterbrille ist, die dann das vorgibt, was alle anderen dann auch sehen. Denn ich kann mir auch vorstellen, wenn fünf Kinder aus verschiedenen Perspektiven draufgucken, gibt's entweder ein grosses Durcheinander oder irgendein technisches Gerät reguliert das (lachen). Oder jeder sieht dann auch, wie mit den eigenen Augen, wirklich nur seine Version und man ist in der Lage, einfach zu deuten und den Anderen das zu erklären.» (Frank, 15–28)
1.2 Isolation: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version, die Isolation einzelner Lernender in Bezug zu ihrem Umfeld betreffen
«B: Es kann, es kann natürlich sein, dass wenn nur ein Kind diese Brille hat, dass es sich auch schnell erschöpft, dass man, vielleicht müssen wir dann auch, wenn ich mir irgendwie eine Gruppenarbeit vorstelle und jede Gruppe hat eine Brille, vielleicht, müsste man nach so, nach, nach einem ersten Erfahren und Ausprobieren doch auch einige Kinder dann mit etwas anderem beschäftigen, oder sie vielleicht, auf die herkömmliche Art und Weise dann innerhalb einer Gruppe etwas bauen lassen und dass sie dann irgendwie darüber sprechen.» (Kira, 80)
U_Applicability
1 Passung auf Nutzerinnen und Nutzer: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version, die die Passung der Technologien auf die Nutzerinnen und Nutzer betreffen
1.1 Grundschulspezifische Aspekte
1.1.1 Physische und motorische Voraussetzungen: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version im Hinblick auf besondere physische und motorische Voraussetzungen von Kindern im Grundschulalter
«B: Ja, also auf keinen Fall erstes, zweites Schuljahr, das finde ich schwierig. Ich könnte mir auch vorstellen, je länger man diese Brille auf dem Kopf hat, umso angestrengter ist [...]» (Frank, 32)
1.1.2 Kognitive Voraussetzungen: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version im Hinblick auf besondere kognitive Voraussetzungen von Kindern im Grundschulalter

«B: [...] und die Komplexität (der Brillen, eigene Ergänzung, Teilnehmender zeigt auf Brille) muss für Kinder, vor allen Dingen im Grundschulalter natürlich noch deutlich schrumpfen.» (Freddie, 74)
1.2 Allgemeine physische Aspekte: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version im Hinblick auf allgemeine physische Aspekte, die Nutzerinnen und Nutzer jeden Alters betreffen
«B: Also ich muss sagen, das ist halt schon etwas, was halt anstrengend ist, ist dieses ich gucke in die Brille, ich gucke auf die Realität. Da merke ich, da habe ich Adaptionsschwierigkeiten von den Augen her.» (Jack, 21)
U_Motivation
1 Intrinsische Motivation: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version im Hinblick auf die intrinsische Motivation, die bei Lernenden durch die jeweilige Technologie hervorgerufen werden
«B: Ja also das ist auch ganz klar. Ich glaube, die Brille ist der höchste Spassfaktor (lachen). Also in der Rangordnung wird die Brille am meisten begeistern und dann aber auch das Tablet auch. Ja durchaus.» (Freddie, 58)
1.1 Tempo Beschäftigung mit Lerninhalt «Schaltungen» / «Schaltskizzen»
«B: [...] und mit der Brille bin ich für mich, da kann ich in meinem Tempo arbeiten, ich habe auch nicht den Stress: oh Gott wie weit ist der und der. Ich mache einfach nach meinem Tempo und nach meinem Verständnis da weiter. Also deshalb, ich finde beides wichtig, aber um die Motivation zu fördern, finde ich das da noch ein Tick besser.» (Frank, 12)
U_Valuation of Prior Knowledge
1 Bekanntheit aus dem Alltag: Unterschiede zwischen der Tablet-Version und der Brillen-Version, die die Bekanntheit der Technologien aus dem Alltag betreffen
«B: iPads kennen die Kinder schon, ist auch mittlerweile in Fleisch und Blut übergegangen, daher, dass sie es auch von zuhause kennen.» (Jack, 75)

3 Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der Dissertation in Bezug zu den in der Einleitung formulierten Fragen im Abschnitt „Zielsetzung“ zusammengefasst. Ferner werden durch die Dissertation eröffnete Forschungs- bzw. Entwicklungsdesiderata beschrieben sowie theoretische und / oder konzeptionelle Weiterentwicklungen von Konstrukten bzw. Modellierungen skizziert.

1. Wie lässt sich der fach-medien-didaktische Einsatz von AR im Sachunterricht modellieren?

Wie in den Kapiteln 1.2 und 2.3 beschrieben wurde, wurde für eine differenzierte Betrachtung des fach-medien-didaktischen Einsatzes von AR im Rahmen dieser Arbeit das „Model of Usefulness ob Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002, fortan wieder bezeichnet als Usefulness-Modell) herangezogen. Es erlaubt die summative Beurteilung einer Usefulness – sowohl von AR als auch von anderen Technologien / Medien / Tools – durch Gegenüberstellung von bzw. Aushandlung zwischen einzelnen Evaluationen bzgl. verschiedener inhaltlicher Gesichtspunkte (Usability und Utility: Value Added oder PU). Diese Einzelevaluationen können je nach betrachteter Technologie / betrachtetem Medium / betrachtetem Tool durchaus unterschiedlich ausfallen und so muss die Gewichtung der Ergebnisse dieser Einzelevaluationen anhand der Gegebenheiten der zugrundeliegenden Lehr-Lern-Situation individuell abgewogen werden.

Eine begriffliche Weiterentwicklung bzw. Präzision zur Verortung bzw. Ausweisung didaktischer Aspekte der PU wurde im Rahmen der Publikationen 7 bzw. 8 postuliert und kann Gegenstand zukünftiger konzeptioneller Überarbeitungen des Modells sein. Ein in dieser Weise ausdifferenziertes und didaktisch gewendetes Modell könnte künftig zur bewussten Trennung der ökonomischen Betrachtung des Medieneinsatzes („Mehrwert-Betrachtung“) von pädagogisch-didaktischen Charakteristika des Mediums (Konzipierung von „Utopien“ bzw. Möglichkeiten) herangezogen werden.

Für die konkrete Aushandlung zwischen pädagogischen, fach- und mediendidaktischen Aspekten des Einsatzes von Medien (hier speziell AR) in Lehr-Lern-Situationen wurde das deAR-Modell (Publikation 2) als praxisnahes Handlungsmodell vorgestellt. Die generelle Notwendigkeit der Überarbeitung bestehender Modellierungen zum Medialen Lernen wegen der zunehmenden Verschmelzung von Realität und Digitalität im Kontext von AR aus Publikation 1 wird durch das aktuelle Verständnis einer Digitalität als Endzustand der Digitalisierung (vgl. Kapitel 1.1.2) weiter verstärkt und stellt ebenfalls einen möglichen zukünftigen theoretisch-konzeptionellen Forschungsgegenstand dar, welcher aufbauend auf

den Ergebnissen dieser Arbeit adressiert werden kann. Gleiches gilt für Konkretisierungen bzw. Adaptionen bestehender Modellierungen wie des Usefulness-Modells oder des deAR-Modells zur Berücksichtigung der vielperspektivischen Rekonstruktion bzw. Adressierung von Lerninhalten im Sachunterricht (vgl. hierzu auch das Kreismodell, vgl. Peschel 2016).

Fazit 1: In dieser Dissertation wurden sowohl das deAR-Modell als auch das Usefulness-Modell fokussiert. Beide Modelle fokussieren verschiedene Ebenen des fach-medien-didaktischen Einsatzes von (digitalen) Medien, speziell hier AR, im (Sach-)Unterricht: Das Usefulness-Modell adressiert die Frage „Was nützt es mir/den Lernenden / ...?“ und das deAR-Modell hilft bei der Planung / Umsetzung / Reflexion medial bzw. speziell mit AR angereicherter Lehr-Lern-Arrangements. Allerdings könnte das Usefulness-Modell auch einen konzeptionellen Rahmen um das deAR-Modell bilden, indem der Leitgedanke „Was nützt es mir / den Lernenden / ...?“ die Aushandlung zwischen den verschiedenen Aspekten im deAR-Modell (Pädagogische, fachliche, fachdidaktische, mediendidaktische, technische Aspekte) stützt. Gleichsam scheint es denkbar, die im deAR-Modell zu findenden Aspekte zu einer theoretischen Ausschärfung der Begrifflichkeiten und Hierarchien bzw. Wirkgefüge der verschiedenen Faktoren im Usefulness-Modell heranzuziehen. Eine theoriegeleitete, ggf. sogar empirisch gestützte gemeinsame Weiterentwicklung stellt also ein spannendes zukünftiges Forschungsdesiderat dar.

2. Wie lässt sich ein fach-medien-didaktisches AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken konzipieren und technisch realisieren?

Im Rahmen der Publikationen 3 und 4 wurden zwei aufeinander aufbauende Prototypen eines AR-Lehr-Lern-Tools zum Erlernen von Schaltsymboliken für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht vorgestellt. Sie wurden im Zuge einer fach-medien-didaktischen Rekonstruktion entlang des deAR-Modells (Publikation 2) anhand pädagogischer, fachlicher, fach- und mediendidaktischer Aspekte sowie technischer Charakteristika der jeweiligen AR-Technologie (Brillen-AR vs. Tablet-AR) konzipiert und realisiert (vgl. Kapitel 2.1.2). In der Zwischenzeit wurde darüber hinaus ein dritter Prototyp entwickelt, welcher weitere technische Verbesserungen bzw. Neuerungen aufweist (Javaheri et al. 2022). Beispielhaft hierfür sind eine stark verringerte Reaktionszeit der Anpassung der visualisierten Schaltsymboliken in AR bei Veränderungen der realen Schaltung sowie die Möglichkeit zur Erkennung und symbolischen Visualisierung von Parallelschaltungen zu nennen. Trotz all dieser Entwicklungsstufen müssen zukünftig weitere technische Optimierungen vorgenommen werden, die sowohl die Usability als auch die PU betreffen (vgl. dazu auch die Ergebnisse der Studien der Publikationen 6 und 8), bevor das AR-Lehr-Lern-Tool in realen Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden kann. Bei einer Gesamtbeurteilung der Usefulness dieses AR-

Lehr-Lern-Tools wird hier deutlich, wie für den praktischen Einsatz eines Tools die technische Umsetzbarkeit bzw. Handhabbarkeit (Usability) die pädagogisch-didaktisch durchdachte Optimierung (Utility) limitieren kann, da die Usability als Argument für oder wider den praktischen Einsatz letztlich stärker ins Gewicht zu fallen scheint (vgl. Kapitel 1.3.3).

Fazit 2: Insgesamt gestaltete sich die fach-medien-didaktische Realisierung des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken noch als sehr schwierig, da insbesondere aus technischer Sicht die Umsetzung pädagogisch-didaktisch sinnvoller Funktionalitäten limitiert wurde. Es wird sich zeigen, inwieweit aktuelle Weiterentwicklungen von AR-Hard- und Software (z. B. von Apple oder Google) diese Limitationen reduzieren werden.

3. Welche weiteren fach-medien-didaktischen AR-Tools bzw. -Anwendungen lassen sich für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht skizzieren?

In Publikation 5 wurden –zusätzlich zu dem AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken (Publikation 3 und 4) – weitere fach-medien-didaktisch rekonstruierte Praxisideen für den Einsatz von AR im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht skizziert. Diese könnten in Bezug auf das Usefulness-Modells zunächst als „Utopien“ (=Skizzierung eines im Sinne des Modells guten / „nützlichen“ Lehr-Lern-Tools) verstanden werden, welche für eine etwaige zukünftige Realisierung einer Aushandlung / Prüfung mit technischen Gestaltungs- bzw. Umsetzungsmöglichkeiten bedürfen. Über den Rahmen dieser (noch) „Utopien“ hinaus sind auch AR-Tools zu nennen, welche mittlerweile auf den meisten Smartphones oder Tablets verfügbar sind und deren Einsatzzwecke sehr vielfältig sein können: Sie bieten Funktionalitäten wie Echtzeit-Übersetzungen in der Kamerasicht oder Zusatzinfos zu Gegenständen / Fotos / Produkten etc. (z. B. in der Google App).

Fazit 3: Neben dem AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken lassen sich auch weitere fach-medien-didaktische AR-Tools bzw. -Anwendungen für den (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht entlang des Usefulness-Modells entwickeln und skizzieren, wenngleich ihre technische Realisierung zumeist noch nicht möglich ist.

4. Wie „benutzbar“ sind AR-Technologien, mit denen das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken realisiert werden soll, aus technischer Sicht mit Kindern im Grundschulalter?

Die Studie in Publikation 6 konnte erste Anhaltspunkte dafür liefern, dass AR-Brillen (in Ergänzung zu bereits genutzter AR auf Tablets oder Smartphones) immer besser von Kindern im Grundschulalter benutzt werden können. Insbesondere konnten deutliche Verbesserungen bzgl. der Erkennung und Verarbeitung von durch Kinderstimmen gegebenen Sprachbefehlen

beobachtet werden. Aus didaktischer Sicht ist dies vielversprechend, da bei optimaler Usability der Brillen-AR das AR-Gerät im Hintergrund verbleibt, sodass mehr kognitive Ressourcen für die Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 1.3.3). Brillen-AR ist mit diesem Argument also aus didaktischer Sicht gegenüber der Tablet-AR die didaktisch sinnvollere AR-Variante (optimale Usability und damit geringe kognitive Belastung durch das AR-Gerät vorausgesetzt).

Allerdings muss beachtet werden, dass die beschriebene Studie in einer Laborumgebung mit kontrollierten Bedingungen und einer eins-zu-eins-Betreuung der Kinder durchgeführt wurde. Dementsprechend muss zukünftig eine entsprechende Testung der Usability von AR-Brillen in realen Unterrichtssituationen erfolgen. Darüber hinaus müssen auch Faktoren wie die hohen Anschaffungskosten (im Verständnis des Usefulness-Modells der Kategorie „Practical Acceptability“ zuzuordnen) in die Beurteilung der Usefulness von AR-Lehr-Lern-Tools mit Brillen-AR einbezogen werden, denn all diese Faktoren beeinflussen gemäß dem Usefulness-Modell letztlich die Akzeptanz von AR-Brillen durch Lernende wie Lehrende in Lehr-Lern-Situationen.

Fazit 4: Vor allem aus fachdidaktischer Sicht sind die beschriebenen Ergebnisse der Studie zur Usability von AR-Brillen positiv zu sehen, da Brillen-AR mit der eben dargelegten Argumentation bei optimaler Usability die fachdidaktisch sinnvollere AR-Technologie darstellt. Bis diese Technologie allerdings so in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden kann, dass dieser Vorteil gegenüber Tablet-AR zum Tragen kommen könnte, müssen allerdings weitere Faktoren in Bezug auf AR-Brillen optimiert werden: Eine Verringerung der vergleichsweise sehr hohen Anschaffungskosten sowie weitere Verbesserungen der Usability müssen zunächst adressiert werden, da diese Faktoren ansonsten im Sinne des Usefulness-Modells negativ überwiegen gegenüber dem möglichen fachdidaktischen Vorteil der Brillen-AR.

5. Wie „benutzbar“ ist das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken aus pädagogisch-didaktischer Sicht?

Die Ergebnisse der Studie, welche in Publikation 7 skizziert und in Publikation 8 ausführlich beschrieben wurde, deuten darauf hin, dass das AR-Lehr-Lern-Tool zu Schaltsymboliken bereits grundsätzlich pädagogisch-didaktisch geeignet ist für den Einsatz in Lehr-Lern-Situationen. Allerdings nannten die befragten Grundschullehrkräfte derzeit noch keine oder kaum Vorteile dieses Tools gegenüber einer bestmöglichen Alternative ohne AR. Außerdem deuten die Äußerungen der befragten Grundschullehrkräfte darauf hin, dass das Tool erst nach weiterer technischer Optimierung aus pädagogisch-didaktischer Sicht verlässlich in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden kann.

Auch diese Ergebnisse machen deutlich, wie zentral die technische Benutzbarkeit (Usability) für den Einsatz von Medien bzw. Tools in Lehr-Lern-Situationen, insbesondere für deren Akzeptanz in Lehr-Lern-Situationen (im Sinne des Usefulness-Modells) zu sein scheint. Zukünftige Untersuchungen zur PU könnten zukünftig auch für (AR-)Lehr-Lern-Tools mit anderen Fachbezügen durchgeführt und mit den Ergebnissen dieser Studie verglichen werden, um pädagogisch-didaktisch sinnvolle und fach-medien-didaktisch rekonstruierte Anwendungsszenarien für AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht weiter zu erschließen.

Fazit 5: Die Ergebnisse der beschriebenen Studie zur PU des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken zeigen, dass nach Einschätzung der befragten Grundschullehrkräfte das AR-Lehr-Lern-Tool erst nach umfassender technischer Optimierung in Lehr-Lern-Situationen eingesetzt werden kann. Auch hier deutet sich also ein maßgeblicher Einfluss der Usability auf die Akzeptanz von Technologien (hier: AR) in Lehr-Lern-Situationen an.

Gesamtfazit

Insgesamt lässt sich folgendes Gesamtfazit ziehen: Die Konzeption fach-medien-didaktischer AR kann entlang bestehender Modellierungen wie dem deAR-Modell (Publikation 2) und dem Usefulness-Modell erfolgen. Die technische Realisierung fach-medien-didaktisch konzipierter AR scheint aktuell die größte Hürde darzustellen. Kurz: Unzureichende Usability nivelliert eventuelle pädagogisch-didaktische Innovationen fach-medien-didaktischer AR.

Ausblick

Insbesondere für den Sachunterricht und für den fach-medien-didaktischen Einsatz von AR sind die Ergebnisse dieser Arbeit zunächst von exemplarischer Bedeutung, da es speziell für den Sachunterricht aufgrund einer spärlichen Forschungslage wenige anschlussfähige Befunde gibt. Zukünftig muss darüber hinaus eine Erprobung des entwickelten AR-Lehr-Lern-Tools und damit auch eine Validierung der im Rahmen von Befragungen bzw. Untersuchungen in Labor gewonnenen Erkenntnisse zu diesem Tool in realen Lehr-Lern-Situationen erfolgen.

Wie bereits zu Beginn erwähnt, sei noch einmal hervorgehoben, dass die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse nicht auf einem vielperspektivisch konzipierten Sachunterricht (GDSU 2013), sondern auf einer isolierten, „monoperspektivischen“ Betrachtung von AR als Lernwerkzeug (im Sinne des Lernens mit Medien, vgl. Peschel 2016) bei einem Fachinhalt mit Bezug zur Physik (Schaltsymboliken) beruhen. Zukünftige Forschungen und Entwicklung zum fach-medien-didaktisch rekonstruierten Einsatz von AR im Sachunterricht sollten daher ggf. auch die vielperspektivische Adressierung von AR selbst als Lerngegenstand und insbesondere die Auseinandersetzung mit der zunehmenden Verschmelzung von Realität und Digitalität in AR und deren Auswirkungen in den Blick nehmen.

Alle Ergebnisse dieser Arbeit können insgesamt auch selbst zu einer kategoriengeleiteten Beurteilung der Usefulness von AR im Allgemeinen bzw. des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken im Besonderen herangezogen werden: Dabei zeigt sich einmal mehr die Stärke des Usefulness-Modells: Unterschiedlich ausfallende Evaluationen bzgl. verschiedener „Äste“ des Modells (Kategorien) können nebeneinander als valide Argumente bestehen und können in ihrer Summe zu einer Gesamt-Beurteilung der Usefulness verhelfen.

4 Literaturverzeichnis

- Abdusselam, M. S., & Karal, H. (2020). The effect of using augmented reality and sensing technology to teach magnetism in high school physics. *R(4)*, 407–424. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1766550>.
- Aeppli, J., Gasser, L., Gutzwiller, E., & Tettenborn, A. (2016). *Empirisches wissenschaftliches Arbeiten—Ein Studienbuch für die Bildungswissenschaften* (4. Aufl.). Verlag Julius Klinkhardt.
- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>.
- Akçayır, M., Akçayır, G., Pektaş, H. M., & Ocak, M. A. (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, 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.054>.
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J., & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, 51, 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>.
- Alzahrani, N. M. (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>.
- Amadeo, R. (2022, September 28). Google Maps gets augmented reality search results. *Ars Technica*. <https://arstechnica.com/gadgets/2022/09/google-maps-gets-augmented-reality-search-results/> [29.10.2023].
- Anderson, C. L., & Anderson, K. M. (2019). Wearable Technology: Meeting the Needs of Individuals with Disabilities and Its Applications to Education. In I. Buchem, R. Klamma, & F. Wild (Hrsg.), *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL)* (S. 59–77). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64301-4_3.
- Arici, F., Yildirim, P., Caliklar, Ş., & Yilmaz, R. M. (2019). Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis. *Computers & Education*, 142, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>.
- Astra, I. M., & Saputra, F. (2018). The Development of a Physics Knowledge Enrichment Book “ Optical Instrument Equipped with Augmented Reality ” to Improve Students'

- Learning Outcomes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1013, 012064.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1013/1/012064>.
- Atteslander, P. (2008). *Methoden der empirischen Sozialforschung* (12., durchges. Aufl). Erich Schmidt Verlag.
- Avila-Garzon, C., Bacca-Acosta, J., Kinshuk, , Duarte, J., & Betancourt, J. (2021). Augmented Reality in Education: An Overview of Twenty-Five Years of Research. *Contemporary Educational Technology*, 13(3), ep302.
<https://doi.org/10.30935/cedtech/10865>.
- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. J., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>.
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., & Kinshuk. (2018). Insights Into the Factors Influencing Student Motivation in Augmented Reality Learning Experiences in Vocational Education and Training. *Frontiers in Psychology*, 9, 1486.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01486>.
- Bach, S. (2018). *Subjektiver Kompetenzerwerb von Schülerinnen und Schülern beim unterrichtlichen Einsatz von kidi-Maps Eine Studie zum Einsatz digitaler Karten am Beispiel von kidi-Maps im Vergleich zu analogen Karten bei Schülerinnen und Schülern einer vierten Jahrgangsstufe im geographisch-orientierten Sachunterricht* [Monographie]. Universität des Saarlandes.
- Bach, S., Peschel, M., & Gryl, Inga. (2023). Digitale vs. Analoge Kartenarbeit im Sachunterricht – Unterschiede im Kompetenzerwerb von Schülerinnen und Schülern. *GDSU-Journal*, 14, 72–78.
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3), 114–123.
- Barma, S., Daniel, S., Bacon, N., Gingras, M.-A., & Fortin, M. (2015). Observation and analysis of a classroom teaching and learning practice based on augmented reality and serious games on mobile platforms. *International Journal of Serious Games*, 2(2).
<https://doi.org/10.17083/ijsg.v2i2.66>.
- Bennett, S., Maton, K., & Kervin, L. (2008). The ‘digital natives’ debate: A critical review of the evidence. *British Journal of Educational Technology*, 39(5), 775–786.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2007.00793.x>.
- Billinghurst, M., Kato, H., Kiyokawa, K., Belcher, D., & Poupyrev, I. (2002). Experiments with Face-To-Face Collaborative AR Interfaces. *Virtual Reality*, 6(3), 107–121.
<https://doi.org/10.1007/s100550200012>.
- Bourges-Waldegg, P., Moreno, L., & Rojano, T. (2000). The role of usability on the implementation and evaluation of educational technology. *Proceedings of the 33rd*

- Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA, 2000, 7.*
<https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926722>.
- Brinda, T., Brüggem, N., Diethelm, I., Knaus, T., Kommer, S., Kopf, C., Missomelius, P., Leschke, R., Tilemann, F., & Weich, A. (2019). Frankfurt-Dreieck zur Bildung in der digital vernetzten Welt: Ein interdisziplinäres Modell. *INFOS*.
<https://doi.org/10.18420/INFOS2019-A1>.
- Brooke, J. (1996). SUS: a „quick and dirty“ usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & I. McClelland (Hrsg.), *Usability Evaluation in Industry* (S. 189–194). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781498710411>.
- Bruner, J. S., Olver, R. R., & Greenfield, P. M. (1971). *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Kohlhammer.
- Brüsemeister, T. (2008). Qualitative Forschung: Ein Überblick. In T. Brüsemeister, *Qualitative Forschung* (S. 53–228). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
https://doi.org/10.1007/978-3-531-91182-3_2.
- Buchner, J., Buntins, K., & Kerres, M. (2021). A Systematic Map of Research Characteristics in Studies on Augmented Reality and Cognitive Load. *Computers and Education Open*, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100036>.
- Buesing, M., & Cook, M. (2013). Augmented Reality Comes to Physics. *The Physics Teacher*, 51(4), 226–228. <https://doi.org/10.1119/1.4795365>.
- Bujak, K. R., Radu, I., Catrambone, R., MacIntyre, B., Zheng, R., & Golubski, G. (2013). A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom. *Computers & Education*, 68, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.02.017>.
- Butcher, K. R. (2014). The Multimedia Principle. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 174–205). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.010>.
- Cai, S., Chang, F.-K., & Wang, X. (2013). Using the Augmented Reality 3D Technique for a Convex Imaging Experiment in a Physics Course. *International Journal of Engineering Education*, 29(4), 856–865.
- Castelan, E., Vinnikov, M., & Alex Zhou, X. (2021). Augmented Reality Anatomy Visualization for Surgery Assistance with HoloLens: AR Surgery Assistance with HoloLens. *ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 329–331.
<https://doi.org/10.1145/3452918.3468005>.
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 659–669 Bd.2.
<https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>.

- Chambers, C. T., & Craig, K. D. (1998). An intrusive impact of anchors in children's faces pain scales. *Pain*, 78(1), 27–37. [https://doi.org/10.1016/S0304-3959\(98\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3959(98)00112-2).
- Chambers, C. T., & Johnston, C. (2002). Developmental Differences in Children's Use of Rating Scales. *Journal of Pediatric Psychology*, 27(1), 27–36. <https://doi.org/10.1093/jpepsy/27.1.27>.
- Chang, Y.-L., Hou, H.-T., Pan, C.-Y., Sung, Y.-T., & Chang, K.-E. (2015). Applying an Augmented Reality in a Mobile Guidance to Increase Sense of Place for Heritage Places. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(2), 166–178.
- Chauhan, S. (2017). A meta-analysis of the impact of technology on learning effectiveness of elementary students. *Computers & Education*, 105, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.11.005>.
- Cheung, S. K. S., Jiao, J., Lee, L.-K., Zhang, X., Li, K. C., & Zhan, Z. (Hrsg.). (2019). Technology in Education: Pedagogical Innovations: 4th International Conference, *ICTE 2019, Guangzhou, China, March 15-17, 2019, Revised Selected Papers* (Bd. 1048). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9895-7>.
- Chiang, T. H. C., Yang, S. J. H., & Hwang, G.-J. (2014). An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students' Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities. *Educational Technology & Society*, 17(4), 352–365.
- Closset, J.-L. (1993). Reasoning about Electricity and Water Circuits: Teaching Consequences in Electricity. In M. Caillot (Hrsg.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology* (S. 97–108). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02878-0_7.
- Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323(5910), 66–69. <https://doi.org/10.1126/science.1167311>.
- Dey, A., Billingham, M., Lindeman, R. W., & Swan, J. E. (2018). A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*, 5(37), Article 37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>.
- DGfE (Deutsche Gesellschaft für Erziehungswissenschaften)-Kommission Grundschulforschung und Pädagogik der Primarstufe. (2022). *Primarstufenbildung und digitale Transformation. Positionspapier der DGfE-Kommission Grundschulforschung und Pädagogik der Primarstufe*. https://www.paedagogik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/06030600/2022/Stellungnahmepapier_Digitalisierung_DGfE_Grundschulforschung_2022.pdf [29.10.2023].
- Di Serio, Á., Ibáñez, M. B., & Kloos, C. D. (2013). Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course. *Computers & Education*, 68, 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.03.002>.

- Döbeli Honegger, B. (2016). *Mehr als 0 und 1—Schule in einer digitalisierten Welt*. hep. https://www.researchgate.net/publication/298422122_Mehr_als_0_und_1_-_Schule_in_einer_digitalisierten_Welt.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>.
- Dresing, T., & Pehl, T. (2012). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (4. Auflage). Eigenverlag.
- Duit, R. (2017). Elektrizitätslehre aus Schülersicht. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 157, 2–7.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction – a framework for improving teaching and learning science*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2848.6720>.
- Dunleavy, M. (2014). Design Principles for Augmented Reality Learning. *TechTrends*, 58(1), 2834. <https://doi.org/10.1007/s11528-013-0717-2>.
- Dunleavy, M., Dede, C., & Mitchell, R. (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>.
- Dünser, A., Walker, L., Horner, H., & Bentall, D. (2012). Creating Interactive Physics Education Books with Augmented Reality. *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference, November 26-30, Melbourne, Victoria, Australia*, 107–114.
- Enyedy, N., Danish, J. A., Delacruz, G., & Kumar, M. (2012). Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(3), 347–378. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9150-3>.
- Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675–701. <https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>.
- Gartner Research. (2013). Hyce Cycle. <https://www.gartner.com/en/documents/2571624>
- Garzón, J., & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>.
- Garzón, J., Kinshuk, Baldiris, S., Gutiérrez, J., & Pavón, J. (2020). How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educational Research Review*, 31, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>.

- Gervé, F. (1998). *Der Computer als Medium im Sachunterricht*. https://www.ph-heidelberg.de/fileadmin/wp/wp-gerve/texte/gerve1998_gsv_computer_als_medium_im_sachunterricht-manuskript.pdf [29.10.2023].
- Gervé, F. (2015). Digitale Medien im Sachunterricht. In J. Kahlert, M. Fölling-Albers, M. Götz, S. Miller, & S. Wittkowske (Hrsg.), *Handbuch Didaktik des Sachunterrichts* (2. Aufl., S. 496–500). Verlag Julius Klinkhardt.
- Gervé, F., & Peschel, M. (2013). Medien im Sachunterricht. In E. Gläser & G. Schönknecht (Hrsg.), *Sachunterricht in der Grundschule* (S. 58–79). Grundschulverband. https://www.ph-heidelberg.de/fileadmin/wp/wp-gerve/texte/gerve-peschel2013_medien-su_manuskript.pdf [29.10.2023].
- Gervé, Friedrich. (2022). Sachunterricht in der Informationsgesellschaft. In A. Becher, E. Blumberg, T. Goll, K. Michalik & C. Tenberge (Hrsg.), *Sachunterricht in der Informationsgesellschaft* (S. 17–29). Klinkhardt. <https://doi.org/10.25656/01:24198>.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (Hrsg.). (2013). *Perspektivrahmen Sachunterricht* (Vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe). Verlag Julius Klinkhardt.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU). (2021). *Sachunterricht und Digitalisierung. Positionspapier der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts*. https://gdsu.de/sites/default/files/PDF/GDSU_2021_Positionspapier_Sachunterricht_und_Digitalisierung_deutsch_de.pdf [29.10.2023].
- Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD). (2018). *Fachliche Bildung in der digitalen Welt—Positionspapier der Gesellschaft für Fachdidaktik*. <https://www.fachdidaktik.org/wordpress/wp-content/uploads/2018/07/GFD-Positionspapier-Fachliche-Bildung-in-der-digitalen-Welt-2018-FINAL-HP-Version.pdf> [29.10.2023].
- Gesellschaft für Informatik (GI) (Hrsg.). (2016). *Dagstuhl-Erklärung—Bildung in der digitalen vernetzten Welt: Eine gemeinsame Erklärung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Seminars auf Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik GmbH*. https://gi.de/fileadmin/GI/Hauptseite/Themen/Dagstuhl-Erklärung_2016-03-23.pdf [29.10.2023].
- Gesellschaft für Informatik (GI). (2019). *Kompetenzen für informatische Bildung im Primarbereich*. <https://dl.gi.de/server/api/core/bitstreams/1371f1bd-1d24-469c-826a-735125116067/content> [29.10.2023].
- Giest, H. (Hrsg.). (2017). *Die naturwissenschaftliche Perspektive konkret*. Verlag Julius Klinkhardt.

- Gläser, Eva & Krumbacher, Christina. (2021). Ausstattung zur technischen Bildung mangelhaft? Eine quantitative Studie zur Situation an Grundschulen. In B. Landwehr, I. Mammes, & L. Murmann (Hrsg.), *Technische Bildung im Sachunterricht der Grundschule—Elementar bedeutsam und dennoch vernachlässigt?* (Bd. 12, S. 151–165). Verlag Julius Klinkhardt.
https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=21537 [29.10.2023].
- Götz, M. (2022). *Media, Imagination and Fantasy*. In *The Routledge International Handbook of Children, Adolescents and Media*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203366981.ch22>.
- Grundschulverband (GSV). (2016). *Standpunkt Medienbildung*.
<https://grundschulverband.de/wp-content/uploads/2019/04/Standpunkt-Medienbildung.pdf> [29.10.2023].
- Haider, M., & Fölling-Albers, M. (2020). Auswirkungen von Analogiemodellen auf den Aufbau konzeptuellen Wissens im Sachunterricht der Grundschule – Beispiel Stromkreis. *Unterrichtswissenschaft*, 48(3), 469–491. <https://doi.org/10.1007/s42010-020-00077-5>.
- Haider, M., & Knoth, S. (Hrsg.). (2021). *Digitale Medien im Sachunterricht der GS in Theorie und Praxis: Didaktisch sinnvolle Einsatzmöglichkeiten und Materialien für alle Themenbereiche* (1. Auflage). AOL Verlag.
- Haider, Michael, Peschel, Markus, Irion, Thomas, Gryl, Inga, Schmeinck, Daniela, & Brämer, Martin. (2022). Die Veränderung der Lebenswelt der Kinder und ihre Folgen für Sachunterricht, Lehrkräftebildung und sachunterrichtsdidaktische Forschung. In A. Becher, E. Blumberg, T. Goll, K. Michalik & C. Tenberge (Hrsg.), *Sachunterricht in der Informationsgesellschaft* (S. 55–72). Julius Klinkhardt.
<https://doi.org/10.25656/01:24201>.
- Hamilton, E. R., Rosenberg, J. M., & Akcaoglu, M. (2016). The Substitution Augmentation Modification Redefinition (SAMR) Model: A Critical Review and Suggestions for its Use. *TechTrends*, 60(5), 433–441. <https://doi.org/10.1007/s11528-016-0091-y>.
- Hanna, L., Ridsen, K., & Alexander, K. (1997). Guidelines for usability testing with children. *Interactions*, 4(5), 9–14. <https://doi.org/10.1145/264044.264045>
- Hattie, J. (2017). *Visible Learning* (Results). <https://visible-learning.org/wp-content/uploads/2018/03/VLPLUS-252-Influences-Hattie-ranking-DEC-2017.pdf> [29.10.2023].
- Hauck-Thum, U. (2021). Grundschule und die Kultur der Digitalität. In U. Hauck-Thum & J. Noller (Hrsg.), *Was ist Digitalität?* (S. 73–82). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-62989-5_6.

- Heller, P. M., & Finley, F. N. (1992). Variable uses of alternative conceptions: A case study in current electricity. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(3), 259–275.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660290306>.
- Helmke, A. (2015). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität: Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts* (6. überarbeitete Auflage). Klett / Kallmeyer.
- Herpich, F., Becker Nunes, F., Guarese, R. L. M., Grunewald, A. N., da Silva, P. F., Krassmann, A. L., & Rockenbach Tarouco, Liane, M. (2019). Mobile Augmented Reality in Science Teaching: An analysis of the pedagogical usability with pre-service teachers. Conference Proceedings. *5th Annual International Conference of the Immersive Learning Research Network* At: London, UK. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-657-4-19>.
- Herzig, B. (2012). *Medienbildung: Grundlagen und Anwendungen*. kopaed.
- Herzig, B. (2017). Digitalisierung und Mediatisierung – didaktische und pädagogische Herausforderungen. In C. Fischer (Hrsg.), *Pädagogischer Mehrwert? Digitale Medien in Schule und Unterricht* (S. 25–57). Waxmann.
- Hillmayr, D., Ziernwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. I., & Reiss, K. M. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, 153, 103897.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103897>.
- Hüther, J. (2005). Neue Medien. In J. Hüther & B. Schorb (Hrsg.), *Grundbegriffe Medienpädagogik* (4. Aufl., S. 345–351). kopaed.
- Ibanez, M.-B., De Castro, A. J., & Delgado Kloos, C. (2017). An Empirical Study of the Use of an Augmented Reality Simulator in a Face-to-Face Physics Course. *2017 IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 469–471.
<https://doi.org/10.1109/ICALT.2017.105>.
- Irion, T. (2016). Digitale Medienbildung in der Grundschule—Primarstufenspezifische und medienpädagogische Anforderungen. In M. Peschel & T. Irion (Hrsg.), *Neue Medien in der Grundschule 2.0: Grundlagen-Konzepte-Perspektiven* (Bd. 141, S. 16–30). Grundschulverband e.V.
- Irion, T. (2018). Wozu digitale Medien in der Grundschule? *Grundschule aktuell*, 152, 3–7.
- Irion, T., & Knoblauch, V. (2021). Lernkulturen in der Digitalität. Von der Buchschule zum zeitgemäßen Lebens- und Lernraum im 21. Jahrhundert. In M. Peschel (Hrsg.), *Kinder lernen Zukunft. Didaktik der Lernkulturen* (S. 122–145). Grundschulverband.
https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=24387 [29.10.2023].
- Irion, T., Peschel, M., & Schmeinck, D. (2023). Grundlegende Bildung in der Digitalität. Was müssen Kinder heute angesichts des digitalen Wandels lernen? In T. Irion, M. Peschel, & Schmeinck, Daniela (Hrsg.), *Grundschule und Digitalität. Grundlagen*,

- Herausforderungen, Praxisbeispiele* (Bd. 155, S. 18–42). Grundschulverband.
<https://doi.org/10.25656/01:25820>
- Irion, T., & Ruber, C. (2019). Das FluX-Prinzip der PH Gmünd. Auf der Suche nach Antworten für die kontextuellen Herausforderungen einer „Digitalen Bildung“ in der Grundschule. In T. Junge & H. Niesyto (Hrsg.), *Digitale Medien in der Grundschullehrerbildung. Erfahrungen aus dem Projekt dileg-SL* (Bd. 12, S. 357–382). kopaed.
- Irion, T., & Scheiter, K. (2018). Didaktische Potenziale digitaler Medien. *Grundschule aktuell*, 142, 8–11.
- Janssen, J.-K. (2019). Die Brille aus der Zukunft. *Computer + Technik*, 7, 40.
- Jara, C. A., Candelas, F. A., Puente, S. T., & Torres, F. (2011). Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory. *Computers & Education*, 57(4), 2451–2461.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.003>.
- Javaheri, H., Lauer, F., Lauer, L., Altmeyer, K., Brünken, R., Peschel, M., Wehn, N., & Lukowicz, P. (2022). Smart Teaching Materials with Real-Time Augmented Reality Support for Introductory Physics Education. *Proceedings of the 2022 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 53–54.
<https://doi.org/10.1145/3544793.3560322>.
- Kapp, S., Thees, M., Strzys, M. P., Beil, F., Kuhn, J., Amiraslanov, O., Javaheri, H., Lukowicz, P., Lauer, F., Rheinländer, C., & Wehn, N. (2019). Augmenting Kirchhoff's laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students. *The Physics Teacher*, 57(1), 52–53.
<https://doi.org/10.1119/1.5084931>.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3–18.
- Kearney, M., Schuck, S., Burden, K., & Aubusson, P. (2012). Viewing mobile learning from a pedagogical perspective. *Research in Learning Technology*, 20(1), 14406.
<https://doi.org/10.3402/rlt.v20i0.14406>.
- Kerres, M. (2008). Mediendidaktik. In U. Sander, F. Von Gross, & K.-U. Hugger (Hrsg.), *Handbuch Medienpädagogik* (S. 116–122). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
https://doi.org/10.1007/978-3-531-91158-8_13.
- Kerres, M. (2018). *Bildung in der digitalen Welt—Wir haben die Wahl*. *denk-doch-mal.de, Online-Magazin für Arbeit-Bildung-Gesellschaft*, 2.
https://www.researchgate.net/publication/324780553_Kerres_M_2018_Bildung_in_der

- [digitalen Welt - Wir haben die Wahl In denk-doch-mal.de Online-Magazin für Arbeit-Bildung-Gesellschaft Ausgabe 02-18 Berufliches Lernen in digitalen Zeiten?channel=doi&linkId=5ae1e49da6fdcc91399fc156&showFulltext=true](#) [29.10.2023].
- Kiyokawa, K., Kurata, Y., & Ohno, H. (2000). An optical see-through display for mutual occlusion of real and virtual environments. *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, 60–67. <https://doi.org/10.1109/ISAR.2000.880924>.
- Klafki, W. (2007). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik: Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage). Beltz Verlag.
- Koehler, M., & Mishra, P. (2009). What is Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK)? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
- Krautter, Y. (2015). Medien im Geographieunterricht nach lernförderlichen Kriterien auswählen. In S. Reinfried & H. Haubrich (Hrsg.), *Geographie unterrichten lernen. Die Didaktik der Geographie* (S. 213–276). Cornelsen.
- Krommer, A. (2019). Wider den Mehrwert! Argumente gegen einen überflüssigen Begriff. In A. Krommer, M. Lindner, D. Mihajlovic, J. Muuß-Merholz, & P. Wampfler (Hrsg.), *Routenplaner #DigitaleBildung. Auf dem Weg zu zeitgemäßem Lernen. Eine Orientierungshilfe im digitalen Wandel* (S. 115–123). ZLL21. <https://routenplaner-digitale-bildung.de/wp-content/uploads/2020/10/Routenplaner%20Digitale%20Bildung%20mit%20Cover%20und%20Ruecken%2004092020%20v1.pdf> [29.10.2023].
- Krug, M., Czok, V., Weitzel, H., Müller, W., & Huwer, J. (2021). Gestaltungsparameter für Lehr-Lernszenarien mit Augmented-Reality-Anwendungen im naturwissenschaftlichen Unterricht—Ein Reviw. In N. Graulich, J. Huwer, & A. Banerji (Hrsg.), *Digitalisation in Chemistry Education. Digitales Lehren und Lernen an Hochschule und Schule im Fach Chemie* (S. 51–58). Waxmann Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31244/9783830994183>.
- Kuhn, J., Lukowicz, P., Hirth, M., & Weppner, J. (2016). gPhysics—Using Google Glass as Experimental Tool for Wearable-Technology Enhanced Learning in Physics. *Ambient Intelligence and Smart Environments*, 212–219. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-530-2-212>.
- Kuhn, J., Müller, A., Hirth, M., Hochberg, K., Klein, P., & Molz, A. (2015). Experimentieren mit Smartphone und Tablet-PC: Einsatzmöglichkeiten für den Physikunterricht im Überblick. *Unterricht Physik*, 145, 4–9.
- Kultusministerkonferenz (KMK). (2017). *Bildung in der Digitalen Welt- Strategie der Kultusministerkonferenz*.

- https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2017/Strategie_neu_2017_datum_1.pdf [29.10.2023].
- Kultusministerkonferenz (KMK). (2019). *Empfehlungen zur Digitalisierung in der Hochschullehre*.
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2019/2019_03_14-Digitalisierung-Hochschullehre.pdf [29.10.2023].
- Kultusministerkonferenz (KMK). (2021). *Lehren und Lernen in der digitalen Welt. Ergänzende Empfehlung zur Strategie „Bildung in der digitalen Welt“*.
https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2021/2021_12_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf [29.10.2023].
- Kunkel, C., & Peschel, M. (2020). Lernen mit und über digitale Medien im Sachunterricht: Entwicklung eines vielperspektivischen Konzepts zur Erschliessung digitaler Medien. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 455–476.
<https://doi.org/10.21240/mpaed/jb17/2020.05.18.X>.
- Laatz, W. (1993). *Empirische Methoden: Ein Lehrbuch für Sozialwissenschaftler*. Harri Deutsch.
- Lamnek, S. (1989). *Qualitative Sozialforschung: Band 2. Methoden und Techniken*. Psychologie Verlags Union.
- Lauer, L., Irion, T., & Peschel, M. (2024). Mehrwert-Diskurse als Werte-Diskurse – Usefulness als didaktischer Gesichtspunkt im medialen Sachunterricht. *GDSU-Journal* (eingereicht).
- Lauer, L., & Peschel, M. (2020). Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen mit Augmented Reality (AR). In C. Maurer, K. Rincke, & M. Hemmer (Hrsg.), *Fachliche Bildung und digitale Transformation—Fachdidaktische Forschung und Diskurse. Fachtagung der Gesellschaft für Fachdidaktik 2020* (S. 64–67). pedocs.
https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=21659.
- Lauer, L., Peschel, M., Marquardt, M., Seibert, J., Lang, V., & Kay, C. (2020). Augmented Reality (AR) in der Primarstufe – Entwicklung einer AR-gestützten Lehr-Lerneinheit zum Thema Elektrik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 944–947). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_944_Lauer.pdf [29.10.2023].
- Lauer, L., Peschel, M., Seibert, J., Lang, V., Eichinger, A., Altmeyer, K., Malone, S., Kelkel, M., Bach, S., Perels, F., & Kay, C. (2021). Untersuchung der Wirkungen von AR-Visualisierungstechniken in der Primarstufe. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 378–381).

- Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_378_Lauer.pdf [29.10.2023].
- Lehmann, E. L., & d'Abbrera, H. J. M. (2006). *Nonparametrics: Statistical methods based on ranks* (Rev. 1. ed). Springer.
- Lenhard, W., & Lenhard, A. (2017). *Computation of Effect Sizes* [dataset]. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17823.92329>.
- Liu, D. S.-M., Yung, C.-H., & Chung, C.-H. (2011). A Physics-Based Augmented Reality Jenga Stacking Game. *2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/DMDCM.2011.24>.
- Loosen, W. (2014). Das Leitfadenterview – eine unterschätzte Methode. In S. Averbek-Lietz & M. Meyen (Hrsg.), *Handbuch nicht standardisierte Methoden in der Kommunikationswissenschaft* (S. 1–15). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05723-7_9-1.
- López-Belmonte, J., Moreno-Guerrero, A.-J., López-Núñez, J.-A., & Hinojo-Lucena, F.-J. (2023). Augmented reality in education. A scientific mapping in Web of Science. *Interactive Learning Environments*, 31(4), 1860–1874. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1859546>.
- Marsh, H. W. (1986). Negative item bias in ratings scales for preadolescent children: A cognitive-developmental phenomenon. *Developmental Psychology*, 22(1), 37–49. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.22.1.37>.
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 31). Cambridge University Press.
- Mayring, P. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (13., überarbeitete Auflage). Beltz.
- McCrum-Gardner, E. (2007). Which is the correct statistical test to use? *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 46(1), 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2007.09.002>.
- McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994–1003. <https://doi.org/10.1119/1.17003>.
- McMillan, J. H., & Schumacher, S. (2006). *Research in education: Evidence-based inquiry* (6. Aufl.). Pearson. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=462991](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=462991) [29.10.2023].
- Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (mpfs). (2020). *KIM-Studie. Kindheit, Internet, Medien*. https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/KIM/2020/KIM-Studie2020_WEB_final.pdf [29.10.2023].

- Mehler-Bicher, A., & Steiger, L. (2014). *Augmented Reality—Theorie und Praxis* (2. Aufl.). Oldenburg.
- Metcalfe, J., & Finn, B. (2013). Metacognition and control of study choice in children. *Metacognition and Learning*, 8(1), 19–46. <https://doi.org/10.1007/s11409-013-9094-7>.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D, 1321-1329. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.102.4646> [29.10.2023].
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum Proc. *SPIE 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies*, (21 December 1995). <https://doi.org/10.1117/12.197321>.
- Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur des Saarlandes (MBK). (2010). *Kernlehrplan Sachunterricht Grundschule*. https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Lehrplaene/Lehrplaene_Grundschohle/GS_Kernlehrplan_Sachunterricht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [29.10.2023].
- Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur des Saarlandes (MBK). (2017). *Landeskonzept Medienbildung an saarländischen Schulen*. https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Bildungsserver/Unterricht_und_Bildungsthemem/Medienbildung/Landeskonzept_Medienbildung.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [29.10.2023].
- Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur des Saarlandes (MBK). (2019). *Basiscurriculum Medienbildung und informatische Bildung, Klassenstufen 1 bis 10*. https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Bildungsserver/Unterricht_und_Bildungsthemem/Medienbildung/Basiscurriculum.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [29.10.2023].
- Mitzlaff, H. (Hrsg.). (2007). *Internationales Handbuch Computer (ICT), Grundschule, Kindergarten und neue Lernkultur*. Schneider.
- Mitzlaff, H. (2010). ICT in der Grundschule und im Sachunterricht – Gestern – heute – morgen – Ein Blick zurück nach vorne. In M. Peschel (Hrsg.), *Neue Medien im Sachunterricht* (S. 7–30). Schneider Verlag Hohengehren.
- Mitzlaff, H. (2016). Medien inklusive—Inklusive Mediendidaktik. In M. Peschel (Hrsg.), *Mediales Lernen. Beispiele für eine inklusive Mediendidaktik* (Bd. 7, S. 17–34). Schneider Verlag Hohengehren.
- Moreno, R. (2006). Learning in High-Tech and Multimedia Environments. *Current Directions in Psychological Science*, 15(2), 63–67. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00408.x>.

- Moskaliuk, J., Kümmel, E., & Irle, G. (2018). *Lernprozess im Fokus: Forschung zu digitalen Medien in der Hochschullehre*. https://www.e-teaching.org/praxis/digital-learning-map-2020/tagungsband_fachtagung_iwmllearnmap_oktober2018.pdf [29.10.2023].
- Munoz-Cristobal, J. A., Jorin-Abellan, I. M., Asensio-Perez, J. I., Martinez-Mones, A., Prieto, L. P., & Dimitriadis, Y. (2015). Supporting Teacher Orchestration in Ubiquitous Learning Environments: A Study in Primary Education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 8(1), 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>.
- Munsinger, B., White, G., & Quarles, J. (2019). The Usability of the Microsoft HoloLens for an Augmented Reality Game to Teach Elementary School Children. *2019 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/VS-Games.2019.8864548>.
- Neuß, N. (2012). *Kinder & Medien: Was Erwachsene wissen sollten* (1. Auflage). Klett/Kallmeyer.
- Nielsen, J. (1990). Evaluating Hypertext Usability. In D. H. Jonassen & H. Mandl (Hrsg.), *Designing Hypermedia for Learning* (S. 147–168). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75945-1_9.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Academic Press.
- Nokelainen, P. (2005). The Technical and Pedagogical Usability Criteria for Digital Learning Material. *Proceedings of ED-MEDIA 2005--World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*, 1011–1016. <https://www.learntechlib.org/p/20212/> [29.10.2023].
- Nokelainen, P. (2006). An empirical assessment of pedagogical usability criteria for digital learning material with elementary school students. *Educational Technology & Society*, 9(2), 178–197.
- Oviatt, S., & Cohen, P. R. (2015). *The Paradigm Shift to Multimodality in Contemporary Computer Interfaces*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02213-5>.
- Ozdemir, M., Sahin, C., Arcagok, S., & Demir, M. K. (2018). The Effect of Augmented Reality Applications in the Learning Process: A MetaAnalysis Study. *Eurasian Journal of Educational Research*, 18(74), 165–186.
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>.
- Pekrun, R. (2006). The Control-Value Theory of Achievement Emotions: Assumptions, Corollaries, and Implications for Educational Research and Practice. *Educational Psychology Review*, 18(4), 315–341. <https://doi.org/10.1007/s10648-006-9029-9>.

- Pekrun, R., Goetz, T., Frenzel, A. C., Barchfeld, P., & Perry, R. P. (2011). Measuring emotions in students' learning and performance: The Achievement Emotions Questionnaire (AEQ). *Contemporary Educational Psychology*, 36(1), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2010.10.002>.
- Peng, J. J., & Müller-Wittig, W. (2010). Understanding Ohm's law: Enlightenment through augmented reality. *ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Sketches on - SA '10*, 1–2. <https://doi.org/10.1145/1899950.1899960>.
- Permana, A. H., Mulyati, D., Bakri, F., Dewi, B. P., & Ambarwulan, D. (2019). The development of an electricity book based on augmented reality technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 1157, 032027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/3/032027>.
- Peschel, M. (2016). Lernen mit Medien und Lernen über Medien. In M. Peschel & T. Irion (Hrsg.), *Neue Medien in der Grundschule 2.0—Grundlagen—Konzepte—Perspektiven* (Bd. 141, S. 33–49). Grundschulverband e.V.
- Peschel, M., Schmeinck, D., & Irion, T. (2023). Lernkulturen und Digitalität. Konzeptionalisierungen aus grundschul- und sachunterrichtsdidaktischer Sicht. In T. Irion, M. Peschel, & Schmeinck, Daniela (Hrsg.), *Grundschule und Digitalität. Grundlagen, Herausforderungen, Praxisbeispiele* (Bd. 155, S. 43–52). Grundschulverband. https://www.pedocs.de/volltexte/2022/25820/pdf/Irion_Peschel_2023_Grundschule_und_Digitalitaet.pdf [29.10.2023].
- Petko, Dominik, Döbeli Honegger, Beat, & Prasse, Doreen. (2018). Digitale Transformation in Bildung und Schule: Facetten, Entwicklungslinien und Herausforderungen für die Lehrerinnen- und Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 36(2), 157–174. <https://doi.org/10.25656/01:17094>.
- Plass, J. L., Moreno, R., & Brünken, R. (Hrsg.). (2010). *Cognitive Load Theory* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844744>
- Pospeschill, M. (2013). *Empirische Methoden in der Psychologie*. Ernst Reinhardt Verlag.
- Prieto, L. P., Holenko Dlab, M., Gutiérrez, I., Abdulwahed, M., & Balid, W. (2011). Orchestrating technology enhanced learning: A literature review and a conceptual framework. *Int. J. Technology Enhanced Learning*, 3(6), 583–598. <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2011.045449>.
- Puentedura, R. R. (2006). *Transformation, technology, and education*. <http://hippasus.com/resources/tte/> [29.10.2023].
- Purchase, H. (1998). Defining multimedia. *IEEE Multimedia*, 5(1), 8–15. <https://doi.org/10.1109/93.664737>.

- Radu, I. (2014). Augmented reality in education: A meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1533–1543.
<https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>.
- Radu, I., & MacIntyre, B. (2012). Using children's developmental psychology to guide augmented-reality design and usability. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 227–236.
<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402561>.
- Radu, I., & Schneider, B. (2019). What Can We Learn from Augmented Reality (AR)?: Benefits and Drawbacks of AR for Inquiry-based Learning of Physics. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300774>.
- Rejeb, A., Keogh, J. G., Leong, G. K., & Treiblmaier, H. (2021). Potentials and challenges of augmented reality smart glasses in logistics and supply chain management: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3747–3776. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1876942>.
- Riemer, V., & Schrader, C. (2019). Mental Model Development in Multimedia Learning: Interrelated Effects of Emotions and Self-Monitoring. *Frontiers in Psychology*, 10, 899.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00899>.
- Rushdi, M. (2017). *Virtual, Augmented, and Mixed Realities: Concepts, Games, Applications, and Long-Term Immersion Effects for the Virternity Project*.
https://www.researchgate.net/publication/320868121_Virtual_Augmented_and_Mixed_Realities_Concepts_Games_Applications_and_Long-Term_Immersion_Effects_for_the_Virternity_Project [29.10.2023].
- Sales Junior, F. M., Ramos, A., Pinho, A. L. S., & Santa Rosa, J. G. (2016). Pedagogical Usability: A theoretical essay for e-learning. *HOLOS*, 32(1), 3–15.
<https://doi.org/10.15628/holos.2016.2593>.
- Sander, U., Gross, F. von, & Hugger, K.-U. (Hrsg.). (2008). *Handbuch Medienpädagogik* (1. Auflage). VS, Verlag für Sozialwissenschaften.
- Schaumburg, H., & Prasse, D. (2018). *Medien und Schule: Theorie - Forschung - Praxis*. Verlag Julius Klinkhardt.
- Schmalstieg, D., & Höllerer, T. (2016). *Augmented reality: Principles and practice*. Addison-Wesley.
- Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13(2), 141–156.
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8).

- Schrackmann, I., Knüsel, D., Moser, T., Mitzlaff, H., & Petko, D. (2008). *Computer und Internet in der Primarschule. Theorie und Praxis von ICT im Unterricht mit 20 Videobeispielen auf zwei DVDs*. 303 pages. <https://doi.org/10.25656/01:6970>.
- Schulmeister, R. (2007). *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design* (4., überarb. und aktualisierte Aufl). Oldenbourg.
- Schulz-Zander, R., & Tulodziecki, G. (2002). Multimedia und Internet—Neue Aufgaben für Schule und Lehrerbildung. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis* (S. 317–331). Beltz.
- Sedlmeier, P., & Renkewitz, F. (2018). *Forschungsmethoden und Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler* (3., aktualisierte und erweiterte Auflage). Pearson.
- Shulman, L. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15, 4–14.
- Silius, K., & Tervakari, A.-M. (2002). *An Evaluation of the Usefulness of Web-Based Learning Environments – The Evaluation Tool into the Portal of Finnish Virtual University*. http://www.mit.jyu.fi/OPE/kurssit/TIES462/Materiaalit/Silius_Tervakari.pdf [29.10.2023].
- Stalder, F. (2016). *Kultur der Digitalität* (Erste Auflage, Originalausgabe). Suhrkamp.
- Stork, E., & Wiesner, H. (1981). Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre und Sachunterricht. Bericht über einen Versuch zur Integration von fachdidaktischer Forschung und schulpraktischer Ausbildung an der Universität. *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe*, 9, 218–230.
- Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M., Kuhn, J., Lukowicz, P., Knierim, P., & Schmidt, A. (2017). Augmenting the thermal flux experiment: A mixed reality approach with the HoloLens. *The Physics Teacher*, 55(6), 376–377. <https://doi.org/10.1119/1.4999739>.
- Strzys, M. P., Thees, M., Kapp, S., & Kuhn, J. (2018, August 1). Smartglasses in STEM laboratory courses—The augmented thermal flux experiment. *Physics Education Research Conference 2018, Washington, DC*. PERC 2018, Washington DC. <https://doi.org/10.1119/perc.2018.pr.Strzys>.
- Sweller, J. (1994). Cognitive Load Theory, Learning Difficulty, and Instructional Design. *Learning and Instruction*, 4, 295–312.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why Some Material Is Difficult to Learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185–233. https://doi.org/10.1207/s1532690xci1203_1.
- Tamim, R. M., Bernard, R. M., Borokhovski, E., Abrami, P. C., & Schmid, R. F. (2011). What Forty Years of Research Says About the Impact of Technology on Learning: A Second-Order Meta-Analysis and Validation Study. *Review of Educational Research*, 81(1), 4–28. <https://doi.org/10.3102/0034654310393361>.

- Teichrew, A., & Erb, R. (2020). Einsatz und Evaluation eines Augmented Reality-Experiments zur Optik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 978–990). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_987_Teichrew.pdf [29.10.2023].
- Tekedere, H., & Göker, H. (2016). Examining the Effectiveness of Augmented Reality Applications in Education: A Meta-Analysis. *International Journal of Environmental & Science Education*, 11(16), 9469–9481.
- Thees, M., Altmeyer, K., Kapp, S., Rexigel, E., Beil, F., Klein, P., Malone, S., Brünken, R., & Kuhn, J. (2022). Augmented Reality for Presenting Real-Time Data During Students' Laboratory Work: Comparing a Head-Mounted Display With a Separate Display. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.804742>.
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P., & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>.
- Thyssen, C., Huwer, J., Irion, T., & Schaal, S. (2023). From TPACK to DPACK: The “Digitality-Related Pedagogical and Content Knowledge”-Model in STEM-Education. *Education Sciences*, 13(8), 769. <https://doi.org/10.3390/educsci13080769>.
- Tulodziecki, G., Herzig, B., & Grafe, S. (2021). *Medienbildung in Schule und Unterricht: Grundlagen und Beispiele* (3., durchgesehene und aktualisierte Auflage). Verlag Julius Klinkhardt.
- Vázquez-Cano, E., Marín-Díaz, V., Oyarvide, W. R. V., & López-Meneses, E. (2020). Use of Augmented Reality to Improve Specific and Transversal Competencies in Students. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 19(8), 393–408. <https://doi.org/10.26803/ijlter.19.8.21>.
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 34(13), 167–171.
- von Rhöneck, C., & Völker, B. (1984). Vorstellungen vom Stromkreis und ihr Einfluss auf den Lernprozess. *Der Physikunterricht*, 18(2), 4–16.
- Vorstand Sektion Medienpädagogik, (DGfE), Rummler, K., Aßmann, S., Bettinger, P., & Wolf, K. D. (2020). Stellungnahme des Vorstands der Sektion Medienpädagogik der DGfE zur Covid-19 Situation: Digitale Medien in Bildung und Erziehung: Krisenzeiten verdeutlichen Defizite und Innovationspotenziale. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 1–2. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2020.07.16.X>.

- Wang, H.-Y., Duh, H. B.-L., Li, N., Lin, T.-J., & Tsai, C.-C. (2014). An Investigation of University Students' Collaborative Inquiry Learning Behaviors in an Augmented Reality Simulation and a Traditional Simulation. *Journal of Science Education and Technology*, 23(5), 682–691. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9494-8>.
- Weatherby, T., Wilhelm, T., Burde, J.-P., Beil, F., Kapp, S., Kuhn, J., & Thees, M. (2020). Visualisierungen bei Simulationen von einfachen Stromkreisen. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 1007–1010). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_1007_Weatherby.pdf [29.10.2023].
- Weinberger, A. (2018). Orchestrierungsmodelle und -szenarien technologie-unterstützten Lernens. In S. Ladel, J. Knopf, & A. Weinberger (Hrsg.), *Digitalisierung und Bildung* (S. 117–139). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18333-2_7.
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht—Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 115–138). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>.
- Wodzinski, R. (2011). *Naturwissenschaftliche Fachkonzepte anbahnen—Anschlussfähigkeit verbessern*. IPN Leibniz-Institut f. d. Pädagogik d. Naturwissenschaften an d. Universität Kiel.
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>.
- Yuen, S. C.-Y., Yaoyuneyong, G., & Johnson, E. (2011). Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE)*, 4(1), 119–140. <https://doi.org/10.18785/jetde.0401.10>.
- Zender, R., Weise, M., von der Heyde, M., & Söbke, H. (2018). Lehren und Lernen mit VR und AR-Was wird erwartet? Was funktioniert? *Proceedings der Pre-Conference-Workshops der 16. E-Learning Fachtagung Informatik (DeLFI 2018)*, 12 Seiten. https://www.researchgate.net/publication/329684397_Lehren_und_Lernen_mit_VR_und_AR-Was_wird_erwartet_Was_funktioniert [29.10.2023].
- Zimmermann, S. (2002). Medienforschung in der Geographie. *Praxis Geographie*, 6, 42–46.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung der Arbeit mit Fokus auf der Einleitung.	4
Abbildung 2: Auszug aus der KIM-Studie des mpfs (2020: 22f) zu Freizeitaktivitäten von Kindern zwischen sechs und dreizehn Jahren in Deutschland (eigene Darstellung).....	6
Abbildung 3: Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments von Nielsen (1993), überarbeitet von Silius & Tervakari (2002), eigene Darstellung, eigene Übersetzungen und eigene Ergänzungen.	11
Abbildung 4: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram et al. (1995), eigene Darstellung.	12
Abbildung 5: Klassifikation von AR-Technologien nach Schmalstieg & Höllerer (2017: 59). Adaptierte Darstellung, eigene Übersetzungen.....	13
Abbildung 6: Gegenüberstellung der in diesem Abschnitt beschriebenen AR-Technologien. Darstellungen der einzelnen Technologien teilweise adaptiert bzw. verändert nach Rushdi 2017 und Kiyokawa et al. 2000 mit eigenen Übersetzungen und eigenen Ergänzungen.	14
Abbildung 7: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu AR-Anwendungen bzw. Tools mit Fachbezug Physik.	21
Abbildung 8: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu AR-Anwendungen bzw. Tools zum Thema Elektrik.	22
Abbildung 9: Gliederung der Arbeit mit Fokus auf den Publikationen der Dissertation.....	25
Abbildung 10: Fach-medien-didaktische Rekonstruktion des AR-Lehr-Lern-Tools zu Schaltsymboliken (vgl. Lauer & Peschel 2020: 66; überarbeitetes Layout, geringfügige Modifikationen).	42
Abbildung 11: Verortung von Technical Usability und Pedagogical Usability in Niensens Modellierung „The various parameters associated with system acceptability“ (Nielsen 1990: 148) bzw. „A model of the attributes of system acceptability“ (Nielsen 1993: 25). Adaptierte Darstellung nach Nokelainen (2006: 180) mit eigenen Übersetzungen.	98

6 Anhang

6.1 Ergänzende Materialien und Daten der empirischen Studien

Die verwendeten Materialien zur Studie und zur Datengewinnung aus Publikation 6 (Kapitel 2.1.1) befinden sich im Anhang der Publikation. Die zugrundeliegenden Daten von Publikation 6 sind öffentlich zugänglich im Open Science Framework (OSF) über folgenden Link: <https://mfr.osf.io/render?url=https%3A%2F%2Fosf.io%2Fdf6w9%2Fdownload>.

Die zugrundeliegenden Daten sowie die verwendeten Materialien zur Studie und zur Datengewinnung aus Publikation 7 (Kapitel 2.3.2) sind öffentlich zugänglich im Open Science Framework (OSF) via https://osf.io/r27ue/?view_only=56ac0f543d734aa68991e21f738aae5e.

6.2 Auflistung weiterer Publikationen außerhalb der Dissertationsschrift

Publikationen in Erstautorschaft

1. Lauer, L., & Peschel, M. (2023). Virtuelle Welten – Neue Realitäten in der Digitalität. Herausforderungen für den (Grundschul-)Unterricht. In T. Irion, M. Peschel & D. Schmeinck (Hrsg.), *Grundschule und Digitalität. Grundlagen, Herausforderungen, Praxisbeispiele* (S. 187–201). Frankfurt a. M.: Grundschulverband e. V. <https://doi.org/10.25656/01:25820>.
2. Lauer, L., & Peschel, M. (2023). Usefulness von Augmented Reality – Eine Modellierung zum fach-medien-didaktischen Potenzial digitaler Medien im Sachunterricht. *GDSU-Journal*, 14, 113–122. https://gdsu.de/sites/default/files/gdsu-info/files/journal_14.pdf [01.10.2023].
3. Lauer, L., & Peschel, M. (2021). Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen mit Augmented Reality (AR). In C. Maurer, K. Rincke, & M. Hemmer (Hrsg.), *Fachliche Bildung und digitale Transformation—Fachdidaktische Forschung und Diskurse. Fachtagung der Gesellschaft für Fachdidaktik 2020* (S. 64–67). pedocs. https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=21659 [11.08.2022].
4. Lauer, L., Peschel, M., Marquardt, M., Seibert, J., Lang, V., & Kay, C. (2020). Augmented Reality (AR) in der Primarstufe – Entwicklung einer AR-gestützten Lehr-Lerneinheit zum Thema Elektrik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen*. (S. 944–947). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_944_Lauer.pdf [11.08.2022].
5. Lauer, L., Peschel, M., Seibert, J., Lang, V., Eichinger, A., Altmeyer, K., Malone, S., Kelkel, M., Bach, S., Perels, F., & Kay, C. (2021). Untersuchung der Wirkungen von AR-Visualisierungstechniken in der Primarstufe. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher*

- Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 378–381). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_378_Lauer.pdf [11.08.2022].
6. Lauer, L., Peschel, M., Fischer, M., & Peifer, P. (2023). Augmented Reality als Mittler im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 525–527). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/PSY08_Lauer.pdf [01.10.2023].

Publikationen in Co-Autorschaft

7. Altmeyer, K., Barz, M., Lauer, L., Peschel, M., Sonntag, D., Brünken, R., & Malone, S. (2023). Digital ink and differentiated subjective ratings for cognitive load measurement in middle childhood. *British Journal of Educational Psychology*, 93, 1–18. <https://doi.org/10.1111/bjep.12595>.
8. Javaheri, H., Lauer, F., Lauer, L., Altmeyer, K., Brünken, R., Peschel, M., Wehn, N. & Lukowicz, P. (2023). Smart Teaching Materials with Real-Time Augmented Reality Support for Introductory Physics Education. In *UbiComp/ISWC '22: ACM Conference for Ubiquitous Computing, September 11-15, 2022* (S. 53–54). Atlanta, Cambridge. <https://doi.org/10.1145/3544793.3560322>.
9. Barz, M., Altmeyer, K., Malone, S., Lauer, L., & Sonntag, D. (2020). Digital Pen Features Predict Task Difficulty and User Performance of Cognitive Tests. *Proceedings of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, 23–32. <https://doi.org/10.1145/3340631.3394839> [11.08.2022].
10. Peschel, M., Seibert, J., & Lauer, L. (2022). Fach-Mediales Lernen – Augmented Reality (AR) im Chemie- und Sachunterricht. In S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen*. (4 Seiten). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2022/TB2022_416_Peschel.pdf [11.08.2022].
11. Peschel, M., Kay, C., Lauer, L., Seibert, J., Marquardt, M., & Lang, V. (2020). Augmented Reality (AR) als Werkzeug im naturwissenschaftlichen Unterricht. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen*. (S. 940–943). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_940_Peschel.pdf [11.08.2022].
12. Kay, C., Peschel, M., Perels, F., Bach, S., Kelkel, M., Lauer, L., Seibert, J., Lang, V., & Eichinger, A. (2021). Kompetenzentwicklung für die Naturwissenschaften durch Augmented Reality. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 362–365). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und

- Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_362_Kay.pdf [11.08.2022].
13. Kay, C., Peschel, M., Perels, F., Lauer, L., Seibert, J., Lang, V., Eichinger, A., Bach, S., & Kelkel, M. (2021). Kompetenzentwicklung durch didaktisch eingebettete Augmented Reality. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 370–373). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_370_Kay.pdf [11.08.2022].
 14. Seibert, J., Marquardt, M., Lang, V., Lauer, L., Peschel, M., Perels, F., Huwer, J., & Kay, C. (2020). AR-MEI-SE: Augmented Reality Multitouch Experiment Instruction in Science Education. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen.* (S. 952–955). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_952_Seibert.pdf [11.08.2022].
 15. Lang, V., Seibert, J., Marquardt, M., Lauer, L., Peschel, M., Perels, F., Kay, C., & Huwer, J. (2020). Augmented Reality Lab License 2.0. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen.* (S. 956–959). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_956_Lang.pdf [11.08.2022].
 16. Marquardt, M., Seibert, J., Lauer, L., Lang, V., Peschel, M., & Kay, C. (2020). Augmented Reality als Werkzeug zur Verknüpfung des Periodensystems der Elemente mit dem Bohr'schen Atommodell. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen.* (S. 948–951). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_948_Marquardt.pdf [11.08.2022].
 17. Eichinger, A., Schmoll, I., Kelkel, M., Seibert, J., Lauer, L., Lang, V., Bach, S., Perels, F., Kay, C. & Peschel, M. (2021). QUANTAG: Augmented-Reality-Campus-Rallye als Einstieg in die Quantentechnologie. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 366–369). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_366_Eichinger.pdf [11.08.2022].
 18. Peschel, M., Billion-Kramer, T., Lauer, L., Peifer, P., Fischer, M., Bühler, E., Grab, B., Gantenbein, J., Lang, V., & Kay, C. W. M. (2023). „Mittler“ zwischen Lernenden und MINT. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 514–517). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/PSY06_1_Peschel.pdf [01.10.2023].
 19. Peschel, M., Billion-Kramer, T., Lauer, L., Peifer, P., Fischer, M., Bühler, E., Grab, B., Gantenbein, J., Lang, V., & Kay, C. W. M. (2023). In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 518–521). Gesellschaft für Didaktik der

- Chemie und Physik (GDGP). https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/PSY06_2_Peschel.pdf [01.10.2023].
20. Peifer, P., Fischer, M., Lauer, L., & Peschel, M. (2023). Sprach-Fach-Wechselwirkungen bei der Erschließung von Phänomenen. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 522–524). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP).. https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/PSY07_Peifer.pdf [01.10.2023].
21. Fischer, M., Peifer, P., Peschel, M., & Lauer, L. (2023). Phänomenbegegnungen als Mittler beim Experimentieren von Grundschulkindern. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 540–542). Kiel: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP). https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/PSY12_Fischer.pdf [01.10.2023].