

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 Elektrik

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.

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.

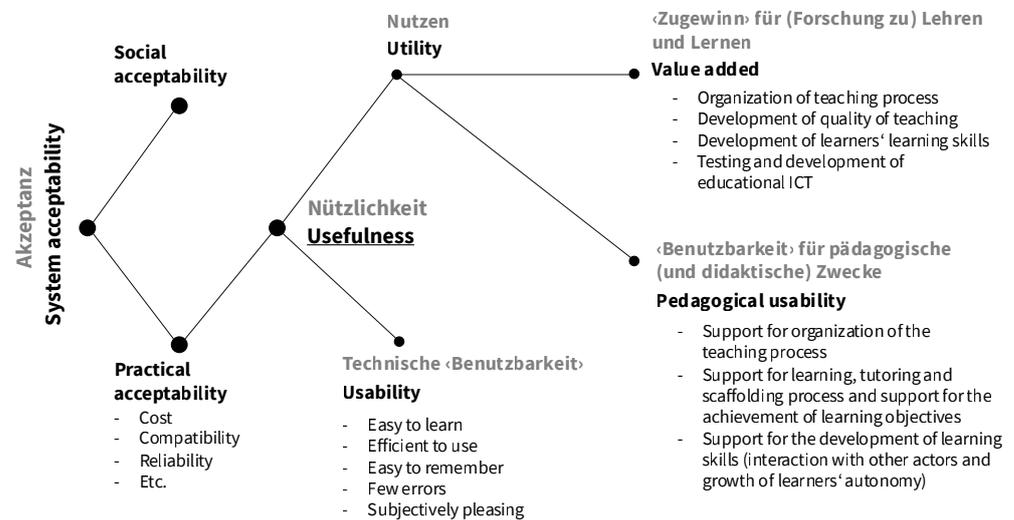


Abb. 1: «Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments» (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius und Tervakari 2003, eigene Darstellung, eigene Übersetzungen, eigene Hervorhebung).

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 Elektrik – bislang vornehmlich für den Physikunterricht der Sekundarstufen, vgl. Lauer und Peschel 2020 – wurde ein AR-Lehr-Lern-Tool zum Thema Elektrik 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 Elektrik (vgl. Haider und Fölling-Albers 2020) wurde der Fachinhalt «Schalt-symboliken», 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.

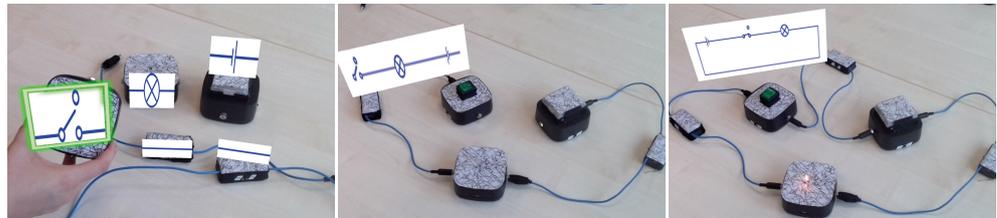


Abb. 2: AR-Lehr-Lern-Tool zur Echtzeit-Visualisierung von Schaltsymboliken aus der Sicht der AR-Brille bzw. aus der Kamerasicht eines Display-Geräts. Links: Symbole einzelner Bauteile und farbliche Hervorhebung bei Berührung. Mitte: Schaltskizze einer offenen Schaltung. Rechts: Schaltskizze einer geschlossenen 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-Verschränkung 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 auszublenzen, 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 begeistern 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 Elektrik 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 auszuschöpfen. 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 Baillet, 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 Averbeck-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>.
- Nuñez-Cristóbal, Juan A., Ivan M. Jorriñ-Abellan, Juan I. Asensio-Perez, Alejandra Martínez-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.learnedtechlib.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 Ladell, 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 Geringliterarisierte: 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 Pfiffigeren 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 Intrinsische 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 Elektrik
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)