

Usefulness von Augmented Reality – Eine Modellierung zum fach-medien-didaktischen Potenzial digitaler Medien im Sachunterricht

Luisa Lauer und Markus Peschel

The everyday life of elementary school students is characterized by an increasing permeation with immersive technologies such as augmented reality (AR) (e.g., home furnishing apps, navigation, Pokémon Go). This requires the evaluation of AR regarding its pedagogical and subject-media-didactic potential as well as the development and evaluation of AR-applications in teaching-learning situations. This is especially needed in primary science and social sciences (Sachunterricht), as there is still a considerable lack of research on AR in this area. The "Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments" (Nielsen 1993) offers a modeling approach for the evaluation of this subject-media-didactic potential, since it represents a new perspective for mostly one-dimensionally conducted value-added discourses through a summative, category-guided assessment of a construct called usefulness. In this paper, this model is explained based on theoretical and empirical findings on the usefulness of AR in primary science and social sciences, and future developments of the model are discussed.

1. Augmented Reality (AR): Teil der Lebenswelt, Teil des Sachunterrichts?!

Die Alltags- und Lebenswelt von Grundschüler*innen wird zunehmend von immersiven Technologien wie Augmented Reality (AR) durchdrungen (Kind et al. 2019). Sie verbreiten sich in erster Linie über Spieleanwendungen mit AR (z. B. Pokémon Go), die bereits von jungen Kindern niedrigschwellig genutzt werden. Charakteristisch für die Technologie AR ist eine Echtzeit-Integration realer und digital erzeugter (=virtueller) Informationen bzw. Visualisierungen (Azuma et al. 2001; Milgram & Kishino 1995; Schmalstieg & Höllerer 2016), z. B. Gesichtsfiter in Apps wie Snapchat oder die virtuelle Einblendung von Pokémon an der nächsten Straßenecke (in der Kamerasicht eines Smartphones oder Tablets¹). Die Integration von AR ist jetzt schon Teil der Alltagswelt der Heranwachsenden und Erwachsenen, z. B. bei der Nutzung von Echtzeit-Navigation auf dem Mobilgerät: Hinweise zur Route und zu Geschäften und Restaurants auf dem Weg können in Echtzeit in der Kamerasicht des Mobilgeräts angezeigt werden (vgl. Abb. 1). Die Nutzung von in die Realwelt integrierten (virtuellen) Zusatzinformationen nimmt immer mehr zu (oft sogar ohne, dass die Nutzer*innen die AR-Integration bemerken oder als solche benennen können). Es ist anzunehmen, dass dieser Bereich in Zukunft durch seine zunehmende gesellschaftliche Prävalenz auch in den Sachunterricht Einzug erhalten wird.

¹ AR kann auch mittels spezieller, auf dem Kopf getragener Brillen erzeugt werden. In diesem Fall scheinen die virtuellen Objekte unmittelbar in die reale Umgebung integriert zu sein.

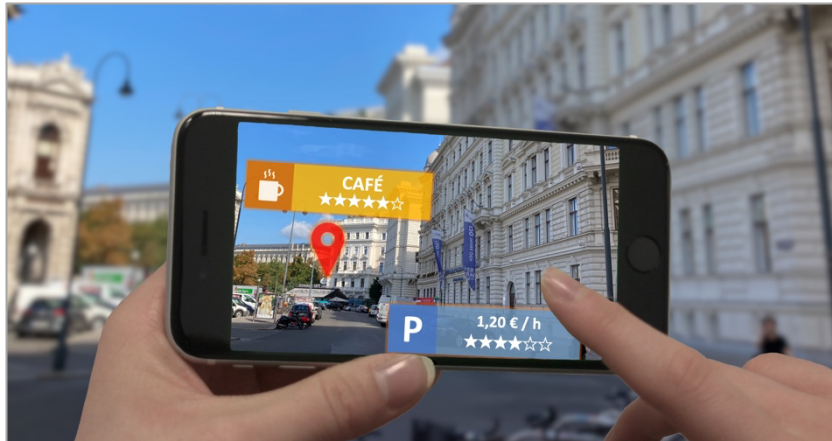


Abb. 1 AR zur Navigation (Konzeptbild): In der Kamerasicht des Smartphones werden in Echtzeit virtuelle Informationen zur umliegenden Infrastruktur und/oder zu Wegbeschreibungen visualisiert

AR besitzt daraus folgend eine zunehmende *Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung* (Irion 2018; Klafki 2007, 15ff) für Grundschüler*innen. Daher muss das Lernen *mit* und *über* (Peschel 2020) AR auch im Sachunterricht adressiert werden, der die Schüler*innen in Sinne seines welterschließenden Verständnisses (GDSU 2013; GDSU 2021) auf eine selbstbestimmte, aktive Teilhabe und Mitwirkung an Gesellschaft (Peschel 2016) vorbereitet.

Angesichts der rasanten Entwicklung im Bereich der digitalen Technologien – insbesondere bei technischen Innovationen wie AR – ist allerdings festzustellen, dass deren didaktischer Einsatz im Sachunterricht der Primarstufe bislang kaum erforscht ist (Irion & Eickelmann 2018; Lauer & Peschel 2022). Daher werden zunächst passende Modellierungen als analysebildender Aspekt der weiteren Forschung benötigt. Derzeitige Modellierungen des Einsatzes digitaler Medien (insbesondere des Einsatzes von AR) fokussieren dabei meist Aspekte der Medienpädagogik bzw. -didaktik und sind weniger fachorientiert. Damit berücksichtigen sie nur begrenzt Aspekte der Fachdidaktik und sind wenig anwendbar auf die Vielperspektivität des Sachunterrichts (Lauer et al. 2020; Lauer & Peschel 2022). Neuere Entwicklungen solcher Modellierungen finden sich in aktuellen Ansätzen der GDSU (2021) oder in dem Perspektivenvernetzenden Themenbereich Digitalisierung (GDSU 2013; Peschel et al. 2022). Solche Modellierungen wie das Kreismodell eignen sich, um den Einsatz von AR im Sachunterricht zu beschreiben, aber (noch) nicht, um eine Bewertung dieses Einsatzes vorzunehmen oder entsprechende Forschungen anzulegen.

2. Usefulness: Kategoriengeleitete Beurteilung der Nützlichkeit statt Medienvergleich

Ergänzend zum Diskurs der Orchestrierung technologiegestützten Lernens (Prieto et al. 2011; Weinberger 2018) und der Mehrwert-Debatte (Krommer 2019) ermöglicht das „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002, vgl. Abb. 2) eine kategoriengeleitete Beurteilung der Nützlichkeit (*Usefulness*) eines technologiegestützten Lehr-Lern-Tools. Zwar wurde das Modell ur-

sprünglich für web-basierte Lehr-Lernumgebungen entwickelt, allerdings lässt sich die Grundkonzeption auch auf andere Technologien (wie etwa AR) übertragen.

Die *Usefulness* setzt sich zusammen aus der durch den / die Nutzer*in empfundenen technischen Benutzbarkeit (*Usability*) und dem (pädagogisch-didaktischen) Nutzen (*Utility*). Diese *Utility* umfasst einerseits den potenziellen Zugewinn für das Lehren und Lernen bzw. für die Forschung zum Lehren und Lernen (*Value Added*), welcher sich auf deutsch am ehesten übersetzen ließe mit dem pädagogisch-didaktischen Mehrwert. Andererseits umfasst die *Utility* auch die generelle Benutzbarkeit für die Unterstützung pädagogisch-didaktischer Aspekte (*Pedagogical Usability*).

Da die verwendeten englischen Begriffe in der deutschsprachigen Bildungsforschung zu- meist keine etablierten, gleichwertigen Übersetzungen haben und ohne Veränderung der Bedeutung nur schwer zu übersetzen sind, werden im weiteren Text diese englischen Begriffe weiterverwendet.

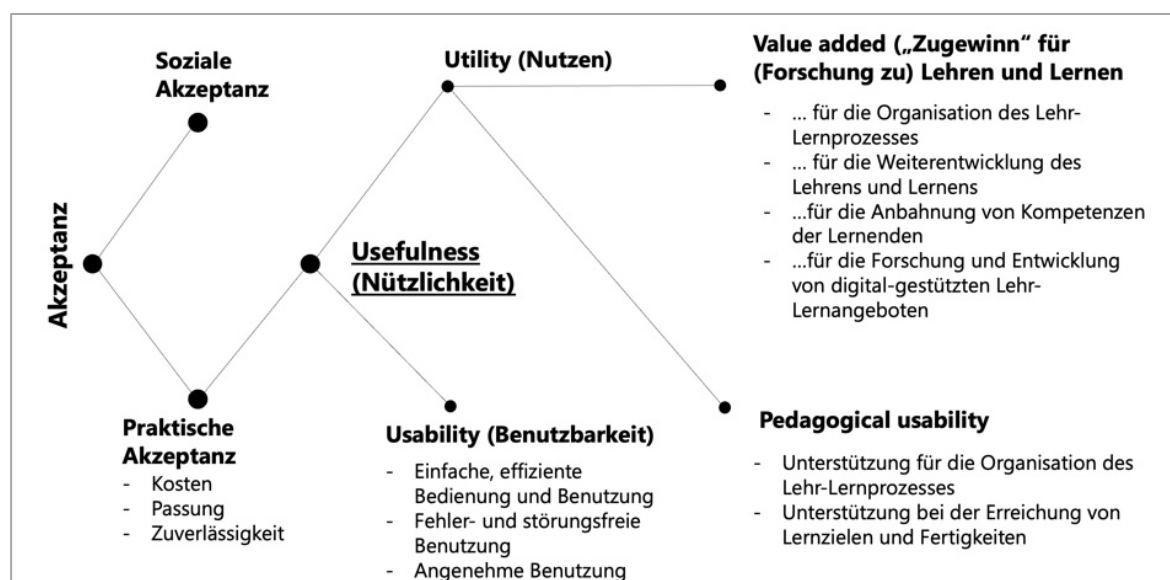


Abb. 2 „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002). Eigene Darstellung, eigene Übersetzungen

Das Modell erlaubt durch die separate Betrachtung verschiedener technischer und pädagogisch-didaktischer Aspekte die Evaluation der *Usefulness* einzelner technologiegestützter Lehr-Lern-Tools, ohne dass ein Vergleich mit einem anderen Tool oder einer anderen Technologie notwendig ist. Soll dennoch ein Vergleich angestellt werden, so erlaubt das Modell einen differenzierten, kategoriengeleiteten Vergleich bezüglich technologie-bezogener Gesichtspunkte oder bezüglich gewisser pädagogisch-didaktischer Aspekte.

Dass eine solche Evaluation der *Usefulness* in Abhängigkeit von der betrachteten Kategorie innerhalb des Modells ganz unterschiedlich ausfallen kann und welche Implikationen dies für etwaige Medienvergleiche und letztendlich den fachdidaktisch sinnvollen Einsatz eines Tools oder einer Technologie im Unterricht haben kann, wird im folgenden Abschnitt für AR dargelegt.

3. Usefulness von AR (im Sachunterricht)

Usability

Die von Nutzer*innen empfundene *Usability* entscheidet neben dem pädagogisch-didaktischen Design eines technologiegestützten Tools über die *Usefulness* des Tools in Lehr-Lernsituationen (Ibáñez & Delgado-Kloos 2018). Nach Nielsen (1993) ist die *Usability* hoch, wenn ein Tool leicht und effizient bedient werden kann, wenn die Bedienung einfach zu merken ist und wenige Fehler bei der Bedienung auftreten. Im Fall von AR kann eine unzureichende *Usability* etwa durch technische Probleme bei der Nutzung des AR-Geräts oder bei der Interaktion in AR entstehen: Es müssen dann viele kognitive Ressourcen der Lernenden (und ggf. auch der Lehrenden) für die Benutzung der Technik aufgewandt werden, die nicht mehr für den eigentlichen Lernprozess zur Verfügung stehen (Bourges-Waldegg et al. 2000). Während AR-Anwendungen für Smartphone oder Tablet meist eine vergleichsweise gute *Usability* aufweisen (Lernende und Lehrende können die Geräte in der Regel leicht bedienen), muss die *Usability* von AR-Anwendungen für auf dem Kopf getragene Brillen (vgl. Abb. 3) noch verbessert werden, bevor diese Geräte sinnvoll im Unterricht eingesetzt werden können (Lauer et al. 2021): Insbesondere die (nicht)Erkennung von Steuerbefehlen für die Benutzung der AR-Brille und/oder der darüber zu bedienenden Anwendung kann die *Usability* beeinträchtigen, z. B. wenn Gesten- oder Sprachbefehle zur Steuerung nicht (richtig) erkannt werden (ebd.). Besonders bei der Benutzung von AR-Brillen durch Grundschulkindern treten solche Probleme häufiger auf als bei Erwachsenen, da die Geräte in der Regel für Erwachsene kalibriert sind und die Kinder sich durch z. B. eine höhere Stimmlage oder kürzere Arme und kleinere Hände von der derzeitigen Zielgruppe für AR-Brillen deutlich unterscheiden (Radu & MacIntyre 2012).

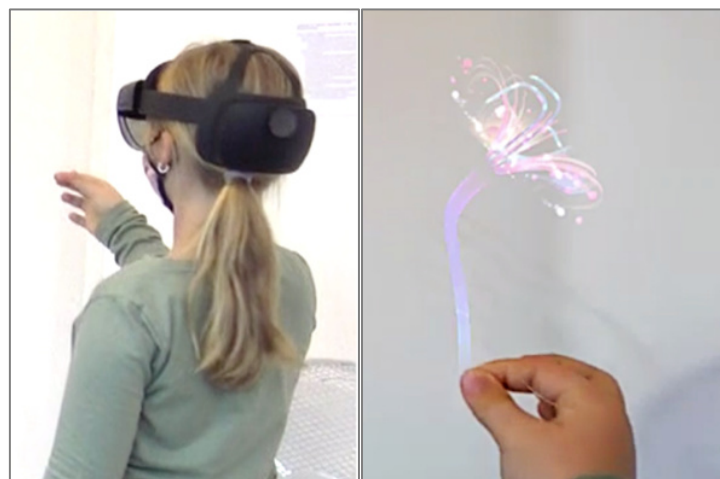


Abb. 3 Grundschulkind mit AR-Brille. Links: Kind bei der Interaktion mit einer virtuellen Blume, rechts: Sicht des Kindes durch die Brille

Auch wenn neueste Untersuchungen andeuten, dass sich die *Usability* von AR-Brillen bei der Benutzung durch Grundschulkindern verbessert hat (Lauer et al. 2021), muss die *Usability*

solcher Brillen sich noch deutlich steigern, bevor sie im Unterricht sinnvoll eingesetzt werden können.

Utility: Value Added

Value Added umfasst das durch eine Technologie gegebene pädagogisch-didaktische Innovationspotenzial gegenüber bisherigen Technologien (Silius et al. 2013). Dieses Innovationspotenzial kann sich zum einen auf konkrete neue pädagogisch-didaktische Gestaltungs- oder Fördermöglichkeiten in Lehr-Lernsituationen beziehen. Andererseits bezieht es sich auch auf Innovationen für die Forschung zum Lehren und Lernen.

In der Anfangszeit wurde AR in Lehr-Lernsituationen meist (nur) genutzt, um Zusatzinformationen an Objekten einzublenden (Dede 2009). Der eigentliche *Value Added* von AR liegt allerdings darin, dass eine gleichzeitige Wahrnehmung und ggf. auch Interaktion von Realität und Virtualität ermöglicht wird (Dunleavy 2014), indem verschiedene, räumlich, zeitlich und semantisch verschränkte Informationskanäle im Blickfeld integriert werden (Beispiele in Abb. 4 und Abb. 5). AR kann insbesondere genutzt werden, um nicht sichtbare oder nicht wahrnehmbare Prozesse/Phänomene in Echtzeit sichtbar(er) zu machen (ebd.) oder um multiple Repräsentationen räumlich (an einem Realobjekt) und zeitlich (in Echtzeit) zu verschränken (Radu & Schneider 2019). Durch Echtzeit-Interaktion in AR bzw. durch Echtzeit-Anpassung der Virtualität an die Realität sind dadurch insbesondere adaptive Lehr-Lernumgebungen in AR denkbar (Anderson & Anderson 2019).

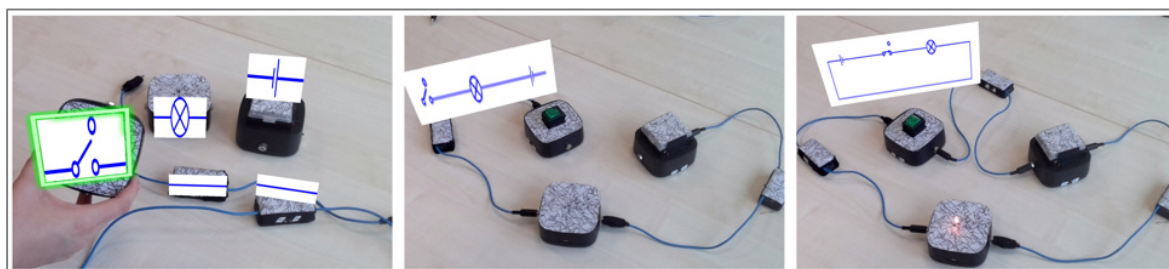


Abb. 4 AR-Tool für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht zur Echtzeit-Visualisierung von Symbolen von Bauteilen/Schaltungen (Lauer et al. 2022)

Mit der zunehmenden Durchdringung der Alltags- und Lebenswelt durch AR ergeben sich für den Sachunterricht auch neue Möglichkeiten für die Vermittlung von Fachinhalten, vor allem die vielperspektivische Auseinandersetzung mit (Aus)Wirkungen und der Entstehung von virtuellen Echtzeit-Anreicherungen der Realität. Daher sind nach unserem Ermessen die Erforschung und Entwicklung entsprechender (sachunterrichts)didaktischer Settings von großer Wichtigkeit, zeigen sie doch das volle Potential von mehrfachbezogenem und vielperspektivischem Lernen auf.

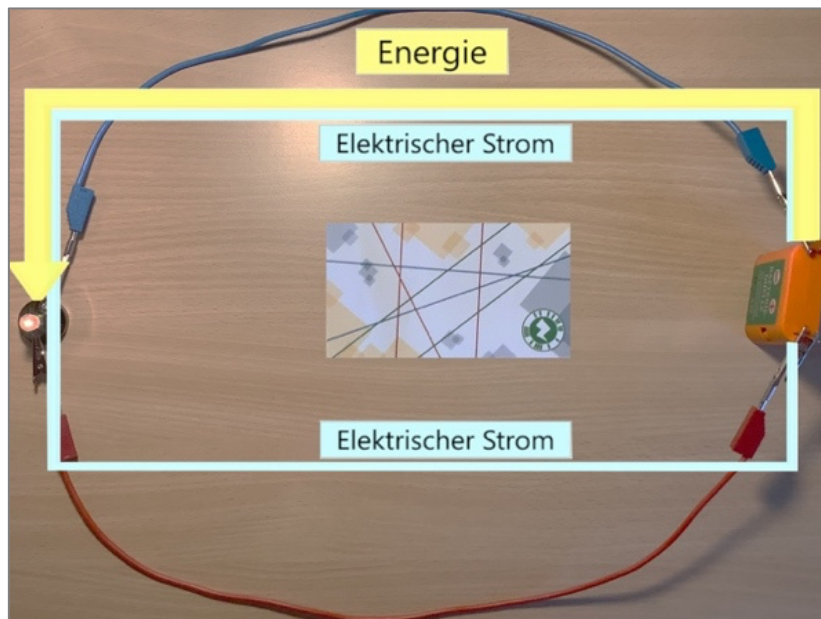


Abb. 5 AR-Tool für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht zur Visualisierung des Energiestroms in Abgrenzung zum elektrischen Strom bei elektrischen Schaltungen.

Utility: Pedagogical Usability

Die *Pedagogical Usability* beschreibt im Gegensatz zur technologie-fokussierten *Usability*, inwieweit ein technologiegestütztes Lehr-Lern-Tool geeignet ist zur Anbahnung pädagogisch-didaktischer Ziele oder zur Unterstützung der Lehrenden oder Lernenden in pädagogischer oder didaktischer Hinsicht (Silius et al. 2013). Noch stärker als bei der *Usability*, die von der eingesetzten Hard- und Software und der Interaktion mit den Nutzer*innen abhängt, ist bei der *Pedagogical Usability* zu betonen, dass sie stark von den anzubahnenden pädagogischen und didaktischen Zielen und von den individuellen Voraussetzungen und Vorkenntnissen der Lernenden abhängt (ebd.). Dies fokussiert die eigentliche (sach)unterrichtliche Auseinandersetzung in Bezug auf neue (immersive) Technologien unter dem Primat der Pädagogik. Gleichzeitig wird so das Primat der Pädagogik um Aspekte von Didaktik erweitert und die häufig emotional oder dichotom geführte Debatte von Pädagogik und Digitalisierung wird einer differenzierten Analyse zugänglich. In der Literatur wird die *Pedagogical Usability* in verschiedene Unter Aspekte (auch Dimensionen genannt) differenziert (vgl. Tab. 1).

Tab. 1 Dimensionen der Pedagogical Usability (PU), adaptiert für AR nach Nokelainen (2005); Sales Junior et al. (2016)

Dimension der PU	Zentrale Aspekte (einer AR-Lehr-Lern-Entwicklung)
Student Control	Kontrollierbarkeit/Steuerbarkeit des Lernprozesses durch die Lernenden
Student Activity	Eigene Aktivitäten der Lernenden
Collaborative & Cooperative Learning	Miteinander-Arbeiten (in sozialer oder technischer Hinsicht)

Guidance to Purposes	Klarheit bzgl. des zugrundeliegenden Fachinhaltes oder der adressierten Lernziele
Applicability	Berücksichtigung individueller Fähigkeiten und Fertigkeiten der Lernenden
Added Value ²	Mehrwert gegenüber einem Setting ohne die AR-Lehr-Lern-Entwicklung
Motivation	Spaß, Interesse oder Anreize zur längeren Beschäftigung
Valuation of Prior Knowledge	Anknüpfung an alltägliches oder schulisches Vorwissen
Flexibility	Verfügbarkeit von Anpassungsmöglichkeiten an individuelle Unterschiede im Lernweg zwischen Lernenden
Feedback	(Individuelle) Rückmeldung an die Lernenden

Bislang wurden kaum AR-Lehr-Lern-Tools hinsichtlich ihrer *Pedagogical Usability* evaluiert, der Fokus lag vielmehr zumeist auf der Technik (vgl. vorheriger Abschnitt zur *Usability* von AR). Eine *Pedagogical Usability*-Evaluation eines AR-Lehr-Lern-Tools für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht (Lauer & Peschel 2023) ergab, dass das Tool Motivation und Interesse wecken könnte, aber weitere technische Optimierungen notwendig sind, die die Anbahnung didaktischer oder pädagogischer Ziele noch besser unterstützen könnten. Die Ergebnisse weiterer Studien (außerhalb des Kontextes der *Pedagogical Usability*) können auf einzelne Aspekte der *Pedagogical Usability* (vgl. Tab. 1) bezogen werden: Es zeigen sich unter anderem (zumindest anfängliche) Motivationseffekte und AR kann die Zusammenarbeit der Lernenden verbessern (Radu 2014).

Fazit: Usefulness von AR im Sachunterricht

Insgesamt deuten die Befunde zur Wirkung von AR in Lehr-Lernsituationen – wenn sie im „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002) interpretiert werden – auf ein positives Gesamtbild hin, das allerdings differenziert betrachtet werden muss: Während AR prinzipiell vielversprechend für einen pädagogisch-didaktisch sinnvollen Einsatz im (Sach)Unterricht zu sein scheint, kann das Potential von AR oftmals wegen technischer Limitationen (noch) nicht voll ausgeschöpft werden: Verlässlich funktionierende und für pädagogisch-didaktische Zwecke (aus technischer Sicht) optimierte AR-Lehr-Lern-Tools gibt es aktuell noch eher wenig – und letztlich entscheidet nicht der Einsatz von AR an sich über den Lernerfolg, sondern die pädagogisch-didaktische Einbettung von AR (Wu et al. 2013).

² Die Autor*innen beschreiben Added Value als Dimension – also als Unteraspekt – der Pedagogical Usability. Es ist zu beachten, dass dabei auch ein anderes (älteres) Model der Usefulness zugrunde gelegt wurde (vgl. beispielsweise Nokelainen 2006, 180), welches Value Added nicht als separaten Aspekt der Utility ausweist so wie hier in Kapitel 2. Hinzu kommt eine inkonsistente Verwendung der Formulierungen „Added Value“ bzw. „Value Added“, insbesondere im Fließtext zu den Modellierungen bei den genannten Publikationen, welche die Begriffs- und Hierarchieunklarheit weiter verstärkt. Daher sollte diese Begriffs- und Hierarchieproblematik künftig aufgearbeitet und behoben werden.

Vor allem in der Unterrichtspraxis wird (nicht zuletzt wegen der technischen Anschaffungs- oder Umsetzungshürden) AR vermehrt mit dem Ziel der Motivation/Begeisterung der Lernenden eingesetzt. Statt sich auf motivationale oder technische Aspekte des Einsatzes von AR zu fokussieren, sollte angesichts immer einfacher zu benutzender Designer-Tools für AR und der zunehmenden Beforschung und Entwicklung zu AR fach- und insbesondere sachunterrichtsdidaktisch durchdachte, niedrighschwellig nutzbare AR – also AR mit hoher *Usefulness* – entwickelt und in der Schule eingesetzt werden. Wegen der zunehmend einfacher zu bedienenden Designer-Tools für AR könnten zukünftig auch verstärkt Lehrkräfte AR-Anwendungen für den eigenen Unterricht entwickeln und verwenden.

4. Zukünftige (Weiter)Entwicklungen der Usefulness

Im Rahmen dieses Beitrags wurde für die Technologie AR gezeigt, dass das „Model of Usefulness of Web-Based Learning Environments“ (Nielsen 1993; überarbeitet von Silius & Tervakari 2002) durch die mit dem Modell indizierten Kategorien (*Usability*, *Value Added* und *Pedagogical Usability*) eine differenzierte Beurteilung des Einsatzes einer Technologie in Lehr-Lernsituationen (des Sachunterrichts) erlaubt. Insbesondere besteht sowohl beim *Value Added* als auch bei der *Pedagogical Usability* die Möglichkeit – und vor allem die Notwendigkeit! – des Einbezugs pädagogisch-didaktischer Prinzipien des zugrundeliegenden Fachs (hier: Sachunterricht) in die Modellierung.

Um das Modell zukünftig noch weiter auf die Fachdidaktik (insbesondere die Didaktik des Sachunterrichts) zu fokussieren, könnten aus bestehenden Modellierungen zum Einsatz/zur Wirkung von digitalen Technologien im (Sach)Unterricht, z. B. dem Kreismodell (vgl. Peschel et al. 2022), dem Dagstuhl-Dreieck (GI 2016), dem Modell Mediales Lernen Sachunterricht (Gervé & Peschel 2013), dem deAR-Modell (Seibert et al. 2020) oder dem DPaCK-Modell (Huwer et al. 2019) Ansätze zu einer (gemeinsamen) Modellierung unter der Leitidee einer kategoriengeleiteten *Usefulness* herausgearbeitet werden.

Literatur

- Anderson, C. L. & Anderson, K. M. (2019): Wearable Technology: Meeting the Needs of Individuals with Disabilities and Its Applications to Education. In: Buchem, I., Klamma, R. & Wild, F. (Hrsg.): Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL). Cham, 59-77. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64301-4_3.
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. J. & MacIntyre, B. (2001): Recent advances in augmented reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications, 21 (6), 34-47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>.
- Bourges-Waldegg, P., Moreno, L. & Rojano, T. (2000): The role of usability on the implementation and evaluation of educational technology. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 1, 1-7. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926722>.
- Dede, C. (2009): Immersive Interfaces for Engagement and Learning. In: Science, 323 Nr. 5910, 66-69. <https://doi.org/10.1126/science.1167311>.
- Dunleavy, M. (2014): Design Principles for Augmented Reality Learning. In: TechTrends, 58 (1), 28-34.
- Gervé, F. & Peschel, M. (2013): Medien im Sachunterricht. In: Gläser, E. & Schönknecht, G. (Hrsg.): Sachunterricht in der Grundschule. Frankfurt am Main, 58-79.

- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2013): *Perspektivrahmen Sachunterricht*. Bad Heilbrunn.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (2021): *Sachunterricht und Digitalisierung*. https://gdsu.de/sites/default/files/PDF/GDSU_2021_Positionspapier_Sachunterricht_und_Digitalisierung_deutsch_de.pdf [14.10.2022].
- Gesellschaft für Informatik (GI) (2016): *Dagstuhl-Erklärung—Bildung in der digitalen vernetzten Welt: Eine gemeinsame Erklärung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Seminars auf Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik GmbH*. https://gi.de/fileadmin/GI/Hauptseite/Themen/Dagstuhl-Erklärung_2016-03-23.pdf [14.10.2022].
- Huwer, J., Irion, T., Kuntze, S., Schaal, S. & Thyssen, C. (2019): Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. In: *MNU Journal*, 5, 358–364.
- Ibáñez, M.-B. & Delgado-Kloos, C. (2018): Augmented reality for STEM learning: A systematic review. In: *Computers & Education*, 123, 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>.
- Irion, T. (2018): Wozu digitale Medien in der Grundschule? In: *Grundschule aktuell*, 152, 3-7.
- Irion, T. & Eickelmann, B. (2018): Digitale Bildung in der Grundschule —7 Handlungsansätze. In: *Grundschule*, 7, 7-12.
- Kind, S., Ferdinand, J.-P., Richter, S. & Weide, S. (2019): *Virtual und Augmented Reality – Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen [Arbeitsbericht Nr. 180]*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. <https://www.wandel-ostthueringen.de/wp-content/uploads/2020/10/VR-AR-Status-Quo.pdf> [14.10.2022].
- Krommer, A. (2019): Wider den Mehrwert! Argumente gegen einen überflüssigen Begriff. In: Krommer, A., Lindner, M., Mihajlovic, D., Muuß-Merholz, J. & Wampfler, P. (Hrsg.): *Routenplaner #DigitaleBildung. Auf dem Weg zu zeitgemäßem Lernen. Eine Orientierungshilfe im digitalen Wandel*. Hamburg, 115-23.
- Lauer, L. & Peschel, M. (2023): «Pedagogical Usability» von Augmented Reality zum Thema Elektrizität. Eine qualitative Studie zum Potential des Einsatzes von AR im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht der Primarstufe. In: *MedienPädagogik* 51 (AR/VR - Part 2), 25–64. <https://doi.org/10.21240/mpaed/51/2023.01.11.X>.
- Lauer, L. & Peschel, M. (2022): Praxisideen für Augmented Reality (AR) im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht. In: Brandt, B., Bröll, L. & Dausend, H. (Hrsg.): *Digitales Lernen in der Grundschule III*. Münster, New York, 227-238. <https://doi.org/10.31244/9783830995913>.
- Lauer, L., Peschel, M., Javaheri, H., Lukowicz, P., Altmeyer, K., Malone, S. & Brünken, R. (2022): Augmented Reality-Toolkit for Real-Time Visualization of Electrical Circuit Schematics. In: *Fostering Scientific Citizenship in an uncertain world – ESERA 2021 e-Proceedings (Part 4)*, 291-296.
- Lauer, L., Altmeyer, K., Malone, S., Barz, M., Brünken, R., Sonntag, D. & Peschel, M. (2021): Investigating the Usability of a Head-Mounted Display Augmented Reality Device in Elementary School Children. In: *Sensors*, 21 (19), 6623. <https://doi.org/10.3390/s21196623>.
- Lauer, L., Peschel, M., Bach, S. & Seibert, J. (2020): Modellierungen Medialen Lernens. In: Kaspar, K., Becker-Mrotzek, M., Hofhues, S., König, J. & Schmeink, D. (Hrsg.): *Bildung, Schule, Digitalisierung*. Münster, New York, 382-387. <https://doi.org/10.301244/9783830992462>.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994): A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D, Nr. 12. http://vered.rose.utoronto.ca/people/paul_dir/IEICE94/ieice.html [14.10.2022].
- Nielsen, J. (1993): *Usability Engineering*. San Diego.
- Nokelainen, P. (2005): The Technical and Pedagogical Usability Criteria for Digital Learning Material. In: *Proceedings of ED-MEDIA 2005--World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*. Waynesville, 1011-1016. <https://www.learntechlib.org/p/20212/> [14.10.2022].

- Nokelainen, P. (2006). An empirical assessment of pedagogical usability criteria for digital learning material with elementary school students. In: *Educational Technology & Society*, 9(2), 178-197. <https://www.researchgate.net/publication/220374935> [28.02.2023].
- Peschel, M., Gryl, I., Straube, P., Bach, S., Brämer, M. & Kunkel, C. (2022): Sachunterrichtliche Bildung in der digitalen Welt. In: Frederking, V. & Romeike, R. (Hrsg.): *Fachliche Bildung in der digitalen Welt*. Münster, New York, 359-387.
- Peschel, M. (2020): Welterschließung als sachunterrichtliches Lernen mit und über digitale Medien–Lernen mit und über digitale Medien als Ausgangspunkt einer umfassenden Sachbildung. In: Thumel, M., Kammerl, R. & Irion, T. (Hrsg.): *Digitale Bildung im Grundschulalter–Grundsatzfragen zum Primat des Pädagogischen*. München, 341-355.
- Peschel, M. (2016): Medienlernen im Sachunterricht – Lernen mit Medien und Lernen über Medien. In: Peschel, M. & Irion, T. (Hrsg.): *Neue Medien in der Grundschule 2.0*. Frankfurt am Main, 33-49.
- Prieto, L. P., Holenko Dlab, M., Gutiérrez, I., Abdulwahed, M. & Balid, W. (2011): Orchestrating technology enhanced learning: a literature review and a conceptual framework. In: *Int. Journal of Technology Enhanced Learning* 3 (6)6, 583-98. <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2011.045449>.
- Radu, I. & Schneider, B. (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*. Glasgow. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300774>.
- Radu, I. (2014): Augmented Reality in Education: A Meta-Review and Cross-Media Analysis. In: *Personal and Ubiquitous Computing*, 18 (6)6, 1533-43. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>.
- Radu, I. & MacIntyre, B. (2012): Using children's developmental psychology to guide augmented-reality design and usability. In: *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 227-236. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402561>.
- Sales Junior, F. M., Ramos, A., Santos Pinho, A. L. und Santa Rosa, J. G. (2016): Pedagogical Usability: A theoretical essay for e-learning. In: *HOLOS* 32 (1), 3-15. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.2593>.
- Schmalstieg, D. & Höllerer, T. (2016): *Augmented reality: Principles and practice*. München.
- Seibert, J., Lauer, L., Marquardt, M., Peschel, M. & Kay, C. W. M. (2020): deAR: didaktisch eingebettete Augmented Reality. In: Kaspar, K., Becker-Mrotzek, M., Hofhues, S., König, J. & Schmeinek, D. (Hrsg.): *Bildung, Schule, Digitalisierung*. Münster, New York, 451-456. <https://doi.org/10.301244/9783830992462>.
- Silius, K. & Tervakari, A.-M. (2002): An Evaluation of the Usefulness of Web-Based Learning Environments – The Evaluation Tool into the Portal of Finnish Virtual University. http://www.mit.jyu.fi/OPE/kurssit/TIES462/Materiaalit/Silius_Tervakari.pdf [14.10.2022].
- Silius, K., Tervakari, A.-M. & Pohjolainen, S. (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> [14.10.2022].
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y. & Liang, J.-C. (2013): Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. In: *Computers & Education*, 62, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>.