

Fokus von (angehenden) Lehrpersonen bei der Beurteilung von Augmented-Reality-Applikationen mit MINT-Themen

Janine Küng¹, Valerie Amacker¹, Dorothee Brovelli¹

Received: June 2025 / Accepted: January 2026

Strukturiertes Abstract

Hintergrund: Augmented Reality (AR) ermöglicht es im MINT-Unterricht, komplexe Konzepte durch interaktive, dreidimensionale Darstellungen verständlich und greifbar zu machen. Um dieses Potenzial zu nutzen, sind neben der notwendigen technischen Ausstattung und geeigneten Applikationen auch die fachdidaktischen Kompetenzen der Lehrpersonen im Umgang mit dieser Technologie von großer Bedeutung. Für viele Lehrpersonen stellt AR jedoch eine neue und anspruchsvolle Herausforderung dar, da ihre Erfahrungen mit dieser Technologie bislang gering sind. Bereits vor dem Unterrichtseinsatz sollten Lehrpersonen AR-Applikationen wissensbasiert einschätzen, auswählen und lernförderlich einplanen können. Bislang ist jedoch unklar, in welchem Umfang angehende und ausgebildete Lehrpersonen dies tatsächlich umsetzen können und welche Bereiche einer gezielten Förderung bedürfen.

Ziel: Untersucht wird, auf welche TPACK-Wissensbereiche und deren Unterthemen sich (angehende) Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II bei der Bewertung und Auswahl von sowie Planung mit AR-Applikationen mit MINT-Themen beziehen. Hierzu wird das Konzept der professionellen Wahrnehmung als situationsspezifische Fähigkeit hinzugezogen. Auf dieser Grundlage lassen sich Wissensbereiche identifizieren, die bislang unzureichend berücksichtigt wurden, und daher in Aus- und Weiterbildungsangeboten gezielt gefördert werden sollten, um den lernwirksamen Einsatz von AR im MINT-Unterricht zu unterstützen.

Stichprobe/Rahmen: Insgesamt 418 (angehende) Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II (311 in Ausbildung und 107 berufstätig) beurteilten sechs AR-Applikationen, je zwei zu den Themen Stromkreis, Herz/Blutgruppen und Raumgeometrie. Der Fokus liegt auf angehenden Lehrpersonen, damit in weiterführenden Analysen Veränderungen im Verlauf der Ausbildung nachvollzogen werden können.

Design und Methoden: Das Studiendesign orientiert sich an der Methodik von Vignettenstudien zur Erfassung professioneller Wahrnehmung. Anstelle von Beschreibungen konkreter Unterrichtssituationen wurde jedoch eine Planungssituation simuliert, in der (angehende) Lehrpersonen zwei AR-Applikationen zu einem ähnlichen MINT-Thema testen, beurteilen und in eine Unterrichtseinheit einplanen. Die Antworten wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach deduktiv-induktivem Ansatz kategorisiert. Anschließend wurden die Häufigkeiten der Bezugnahmen auf die TPACK-Wissensbereiche sowohl insgesamt als auch getrennt nach Fächern analysiert.

Ergebnisse: Die Ergebnisse zeigen, dass (angehende) Lehrpersonen bei der Beurteilung von AR-Applikationen verschiedene TPACK-Wissensbereiche nutzen, sich aber auf bestimmte Bereiche fokussieren. Schüler*innenkognitionen und die Diagnose von Schüler*innenwissen sowie übergeordnete Kategorien auf der Metaebene werden von den (angehenden) Lehrpersonen im Rahmen der Beurteilung der AR-Applikationen weniger angesprochen. Der Vergleich der Fachbeurteilungen zeigt, dass die (angehenden) Lehrpersonen eine stark applikations- und fächerspezifische Beurteilung vornehmen, indem sie auf die positiven und negativen Aspekte der AR-Applikationen reagieren.

Schlussfolgerungen: Das technologiebezogene fachdidaktische Wissen (TPACK) sollte durch gezielte Schulungen gefördert werden. Ein Schwerpunkt sollte auf das Einbeziehen von Schüler*innenkognitionen und die Diagnose von Schüler*innenwissen gelegt werden. Zudem sollten Lehrpersonen dazu befähigt werden, auch auf einer Metaebene über Technologie, Pädagogik und Fachinhalte nachzudenken, beispielsweise über medienerzieherische und medienbildnerische Aspekte.

Schlüsselwörter: TPACK, Augmented Reality, MINT, Professionelle Wahrnehmung

¹Pädagogische Hochschule Luzern

✉ janine.kueng@phlu.ch

Focus of (Prospective) Teachers when Evaluating Augmented Reality Applications with STEM Topics

Structured Abstract

Background: In STEM education, augmented reality (AR) makes it possible to make complex concepts understandable and tangible through interactive, three-dimensional representations. In addition to the necessary technical equipment and appropriate applications, the competencies of teachers in using this technology are of great importance for realising this potential. For many teachers, however, AR represents a new and demanding challenge, as their experience with this technology has so far been limited. Teachers should be able to evaluate and select AR applications based on their knowledge and plan the educational use of these applications in ways that support learning. It is still unclear, however, to what extent (prospective) teachers are actually able to do this and which areas require targeted support.

Purpose: The study investigates which TPACK knowledge areas and their sub-areas (prospective) teachers at lower and upper secondary level refer to when evaluating, selecting and planning with AR applications with STEM topics. For this purpose, the concept of professional vision as a situation-specific skill is used. On this basis, knowledge areas that have so far been insufficiently addressed can be identified and should therefore be specifically targeted in pre-service and in-service training programs to support the effective use of AR in STEM education.

Sample/setting: A total of 418 (prospective) secondary I and II teachers (311 in training and 107 working) evaluated six AR applications, two each on electrical circuits, heart/blood groups and spatial geometry. The focus is on prospective teachers so that changes over the course of their training can be traced in further analyses.

Design and Methods: The study design is based on the methodology of vignette studies to capture professional vision. However, instead of descriptions of concrete teaching situations, a planning situation was simulated in which (prospective) teachers test and evaluate two AR applications on a similar STEM topic and integrate them into a lesson plan. The responses were categorised using qualitative content analysis according to a deductive-inductive approach. The frequencies of references to the TPACK knowledge areas were then analysed both overall and separately by subject.

Results: The results show that (prospective) teachers use different TPACK knowledge areas when evaluating AR applications but focus on specific areas. Student cognition and diagnosis of student knowledge, as well as meta-level categories are less addressed by (prospective) teachers when assessing AR applications. The comparison of the subject assessments shows that the (prospective) teachers make a very application-specific and therefore subject-specific assessment by reacting to the positive and negative aspects of the AR applications.

Conclusions: Technological pedagogical content knowledge (TPACK) should be promoted through targeted training. Emphasis should be placed on the inclusion of students' cognition and the diagnosis of student knowledge. In addition, teachers should be enabled to think about technology, pedagogy and subject content at a meta-level, for example about media education and media literacy aspects.

Keywords: *TPACK, augmented reality, STEM, professional vision*

1 Einleitung

Die digitale Transformation führt zu einer zunehmenden Verfügbarkeit und Nutzung digitaler Bildungsressourcen (Petko et al., 2018). Eine besonders innovative Technologie ist dabei Augmented Reality (AR), welche die reale Welt mithilfe von Smartphones, Tablets oder AR-Brillen um virtuelle Objekte und Informationen erweitert (Azuma, 1997). AR wird als potenziell lernförderlich für den MINT-Unterricht betrachtet, insbesondere im Hinblick auf die Veranschaulichung abstrakter Inhalte oder schwer zugänglicher Konzepte (Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Sirakaya & Sirakaya, 2020; Arici et al., 2021). Dazu zählen beispielsweise nicht direkt beobachtbare Prozesse in der Biologie (z. B. Blutgruppenverträglichkeit oder Herzfunktionen), räumlich komplexe geometrische Strukturen in der Mathematik sowie nicht unmittelbar wahrnehmbare oder sichtbare Größen wie der elektrische Strom. Durch die dreidimensionale Darstellung mittels AR können Lernende Modelle aus verschiedenen Perspektiven betrachten, Parameter verändern oder Prozesse dynamisch nachverfolgen, was das Verständnis fachlicher Zusammenhänge erleichtern kann (vgl. Teichrew, 2023; Vidak et al., 2024). Gleichzeitig stellt AR für viele Lehrpersonen eine neue und komplexe Herausforderung dar, da sie bislang kaum Erfahrung im Umgang mit dieser Technologie haben. Ein lernförderlicher Einsatz von AR-Applikationen setzt voraus, dass Lehrpersonen diese kompetent beurteilen, auswählen und didaktisch begründet in ihre Unterrichtsplanung integrieren können (Kerres, 2018; Petko et al., 2018; Kerawalla et al., 2006; Kriek, 2016). Bisher ist jedoch unklar, in welchem Umfang Lehrpersonen bereits in der Lage sind, dies umzusetzen, und in welchen Bereichen sie Unterstützung benötigen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit die Lehrpersonenbildung die für einen lernförderlichen Einsatz von AR im MINT-Unterricht erforderlichen Kompetenzen fördert und wo weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Die Studie untersucht daher sowohl angehende als auch ausgebildete Lehrpersonen. Bevor jedoch Vergleiche zwischen diesen Gruppen angestellt werden können, muss zunächst modelliert werden, welche Wissensbestände für die Beurteilung von AR-Applikationen im MINT-Unterricht relevant sind.

Während die Rolle des fachdidaktischen Wissens im MINT-Bereich gut erforscht ist (Depaepe et al., 2013; van Driel et al., 2001), besteht weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich der Frage, wie sich professionelle Wissensbestände unter den Bedingungen der digitalen Transformation verändern (Jang & Chen, 2010; Jin, 2019). In diesem Kontext wird das TPACK-Modell (Koehler & Mishra, 2009) als theoretische Bezugsgröße diskutiert. Es ist wenig darüber bekannt, wie (angehende) Lehrpersonen vorhandenes fachdidaktisches Wissen (pedagogical content knowledge, PCK) auf neue Unterrichtssituationen anwenden, die sich aus der Nutzung digitaler Ressourcen wie AR-Applikationen ergeben. Während einige Aspekte des PCK auf den Unterricht mit digitalen Ressourcen übertragbar sein könnten, könnten andere neu und spezifisch für technologiebezogenes fachdidaktisches Wissen (technological pedagogical content knowledge, TPACK) sein. Bisherige Studien fokussieren häufig auf übergreifende digitale Kompetenzen, vernachlässigen jedoch meist domänen- und technologiespezifische Perspektiven (Chai et al., 2016; Luik et al., 2017; Mouza, 2016; Voogt et al., 2012). Zudem bestehen methodische Defizite, da viele TPACK-Studien auf Selbsteinschätzungen basieren, die nur eingeschränkt mit dem tatsächlichen Unterrichtshandeln übereinstimmen (Gonzalez & Ruiz, 2016; Maderick et al., 2016; Stinken-Rösner et al., 2023).

Um diese Limitationen zu adressieren, orientiert sich die vorliegende Studie am Vorgehen von Vignettenstudien zur Erhebung der professionellen Wahrnehmung (siehe Abschnitt 2.2). Anstelle der Beurteilung von Unterrichtsbeschreibungen wird eine simulierte Unterrichtsplanungssituation genutzt, in der AR-Applikationen mit MINT-Themen erprobt werden. Mithilfe eines deduktiv-induktiv gebildeten Kategoriensystems wird untersucht, auf welche TPACK-Wissensbereiche (angehende) MINT-Lehrpersonen der Sekundarstufen I und II bei der Bewertung, Auswahl und Planung mit AR-Applikationen zurückgreifen. Daraus lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, welche Aspekte bisher unzureichend berücksichtigt wurden, und daher in Aus- und Weiterbildungsangeboten stärker thematisiert werden sollten, um einen lernwirksamen Einsatz von AR im MINT-Unterricht zu fördern.

2 Hintergrund

2.1 TPACK-Modell

Forschungsvorhaben zum Professionswissen von Lehrpersonen beziehen sich häufig auf das Modell von Shulman (1987), welches fachliches Inhaltswissen (content knowledge, CK), pädagogisches Wissen (pedagogical knowledge, PK) und fachdidaktisches Wissen (pedagogical content knowledge, PCK) umfasst. Mit der digitalen Transformation kommt die Anforderung hinzu, dass Lehrpersonen digitale Ressourcen erfolgreich in Lehr- und Lernprozesse implementieren können (Schulz-Zander, 1998). Koehler & Mishra (2009) erweitern daher das Modell von Shulman um vier technologische Wissensbereiche (siehe Abb. 1): das technologische Wissen (technological knowledge, TK), das technologiebezogene fachliche Wissen (technological content knowledge, TCK), das technologiebezogene pädagogische Wissen (technological pedagogical knowledge, TPK) und das technologiebezogene fachdidaktische Wissen (technological pedagogical content knowledge, TPACK) (Voogt et al., 2012). In neueren Spezifizierungen des Modells wird das Kontextwissen (XK) ergänzt, wobei es sich um Kenntnisse der Rahmenbedingungen wie beispielsweise der Schulinfrastruktur handelt (Rosenberg & Koehler, 2015).

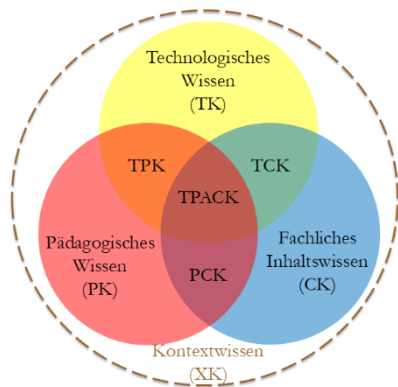


Abb. 1. TPACK-Modell nach Koehler & Mishra (2009) und Rosenberg & Koehler (2015), eigene Darstellung

Ausgehend vom TPACK-Modell wird deutlich, dass die Aus- und Weiterbildung von Lehrpersonen sowie die entsprechende Forschung nicht ausschließlich auf generische Technologiekompetenzen ausgerichtet sein sollten. Ein rein technischer Fokus auf allgemeine digitale Fertigkeiten beschränkt sich auf den Umgang mit Technologien und vernachlässigt die fachlichen sowie pädagogischen Dimensionen des Unterrichts. Von zentraler Bedeutung ist vielmehr, Lehrpersonen zu befähigen, das Potenzial digitaler Technologien gezielt für fachspezifisches Lernen zu nutzen (Voogt et al., 2012). In diesem Zusammenhang unterstreicht die Forschung die Relevanz der Schnittmenge der drei Wissensdomänen (Technologie, Pädagogik und Fachinhalt), da die Integration dieser Bereiche es Lehrpersonen ermöglicht, effektive, technologiegestützte Unterrichtsszenarien für spezifische Lerninhalte zu entwickeln (Koehler & Mishra, 2009; Schmid et al., 2020).

Das DPaCK-Modell (Digitally-Related Pedagogical and Content Knowledge) erweitert das TPACK-Modell, indem soziale und kulturelle Implikationen der digitalen Transformation mit einbezogen werden (Huwer et al., 2019; Thyssen et al., 2023). Trotz dieser relevanten Erweiterung findet das TPACK-Modell aufgrund seiner etablierten Nutzung in der Forschung und der Verfügbarkeit validierter Instrumente zur Selbsteinschätzung weiterhin breite Anwendung.

2.2 Professionelle Wahrnehmung

Die Analyse von Lehrpersonenkompetenzen erfolgt häufig anhand des PID-Modells (perception, interpretation, decision-making) von Blömeke et al. (2015). Meschede et al. (2017) schlagen vor, dieses Modell mit dem Konzept der professionellen Wahrnehmung (professional vision; van Es & Sherin, 2008) zu verbinden (siehe Abb. 2). Diese Kombination eröffnet eine erweiterte Perspektive, die die Bedeutung kognitiver Prozesse in Unterrichtssituationen besonders hervorhebt. Professionelle Wahrnehmung setzt sich aus zwei miteinander verbundenen, wissensbasierten Komponenten zusammen: noticing und knowledge-based reasoning. Noticing bezeichnet die Fähigkeit von Lehrpersonen, relevante Ereignisse in komplexen Unterrichtssituationen zu erkennen und von weniger wichtigen Informationen zu unterscheiden. Knowledge-based reasoning beschreibt die Fähigkeit, diese wahrgenommenen Ereignisse anhand von Professionswissen zu analysieren und zu interpretieren. Ein Beispiel hierfür ist, wenn eine Lehrperson bemerkt, dass eine Schülerin oder ein Schüler glaubt, Strom werde von einer Glühlampe „verbraucht“ (vgl. Duit, 2007; Wilhelm & Hopf, 2018) (noticing oder perception im PID-Modell). Auf der Grundlage ihres fachdidaktischen Wissens über häufige Schüler*innenvorstellungen und Stromkreismodelle (knowledge-based reasoning oder interpretation im PID-Modell) kann die Lehrperson ihre Unterrichtsstrategien anpassen, etwa indem sie das Fahrradkettenmodell (vgl. Kahnt, 2022) zur Erklärung einführt (decision-making im PID-Modell).

Die Fähigkeit zur professionellen Wahrnehmung ist entscheidend für eine effektive Unterrichtspraxis, da sie es Lehrpersonen ermöglicht, flexibel und angemessen auf die Bedürfnisse der Lernenden zu reagieren und den Unterricht kontinuierlich zu optimieren (Meschede et al., 2017). Um diesen situationsspezifischen Charakter des Unterrichts abzubilden, wird die professionelle Wahrnehmung in Studien meist durch eine Beurteilung von text- oder videobasierten Vignetten von Unterrichtssituationen erhoben (Atanasova et al., 2023; Billion-Kramer et al., 2020; Brovelli et al., 2019).

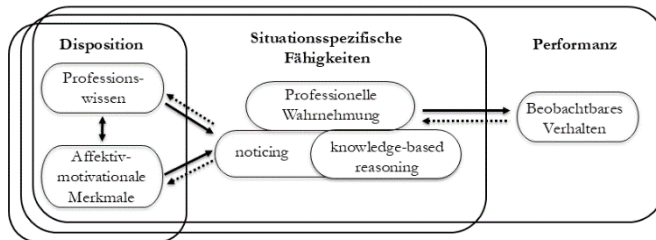


Abb. 2. Modell der Kompetenz als Kontinuum basierend auf Blömeke et al. (2015) und Meschede et al. (2017), eigene Darstellung

2.3 Augmented Reality im MINT-Unterricht

Augmented Reality (AR) erweitert die reale Welt mithilfe von Smartphones, Tablets oder AR-Brillen um virtuelle Objekte und Informationen (Azuma, 1997). Seit dem Erfolg des Smartphone-Spiels Pokémon GO (Niantic, Inc., 2016), bei dem virtuelle Kreaturen in der realen Umgebung gefangen werden, ist Augmented Reality zunehmend gesellschaftlich präsent (Tang, 2017) und wird mittlerweile auch in Lernkontexten eingesetzt. Forschungsergebnisse weisen auf positive Effekte von AR im Bildungsbereich hin, insbesondere in Bezug auf Motivation und Lernerfolg, wobei einige dieser Effekte möglicherweise auf die Neuartigkeit der Technologie zurückzuführen sind (Akçayır & Akçayır, 2017; Garzón & Acevedo, 2019; Sırakaya & Sırakaya, 2020).

Im MINT-Unterricht ermöglicht AR eine dreidimensionale, interaktive Darstellung von Zusammenhängen, Modellen und Strukturen, die schwer zweidimensional zu visualisieren sind (Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Sırakaya & Sırakaya, 2020; Howard & Davis, 2023; Chen et al., 2023; Arici et al., 2021). Dies betrifft beispielsweise biologische Aspekte wie den Aufbau und die Funktion des menschlichen Herzens, bei denen AR Einblicke in anatomische Strukturen und dynamische Prozesse bietet, die in traditionellen Darstellungen nur eingeschränkt erkennbar sind. Bei der Blutgruppenverträglichkeit bietet AR gegenüber klassischen zweidimensionalen Simulationen den Vorteil, dass rote Blutkörperchen, Antigene und Antikörper dreidimensional dargestellt und der Prozess der Agglutination räumlich wie auch dynamisch sichtbar gemacht werden können. Dadurch werden die zugrunde liegenden Mechanismen der Unverträglichkeit transparent und typische Präkonzepte (vgl. Riemer et al., 2010), beispielsweise zur Rolle der Antikörper auf Spender- und Empfängerseite, können gezielt reduziert werden. Auch in der Physik eröffnen AR-Applikationen neue Möglichkeiten, indem sie beispielsweise reale Experimente zum Stromkreis mit dynamischen Stromkreismodellen ergänzen und dadurch die Verbindung zwischen Experiment und zugrunde liegendem Analogiemodell stärken, was das Verständnis für die physikalischen Vorgänge nachweislich erleichtert (Stolzenberger et al., 2023). Für den Mathematikunterricht zeigt sich das Potenzial von AR besonders in der Raumgeometrie, da AR das räumliche Vorstellungsvermögen unterstützt, indem beispielsweise geometrische Körper, ihre Netze und verschiedene Ansichten dynamisch erkundet werden können. Dadurch werden sowohl die mentale Rotation als auch das Verständnis räumlicher Relationen gefördert (Özçakır & Çakıroğlu, 2021a, 2021b).

Studien zur kognitiven Belastung bei der Nutzung von AR liefern inkonsistente Ergebnisse: Während einige eine Zunahme berichten, weisen andere auf eine Abnahme hin (Buchner et al., 2022; Altmeyer et al., 2020; Thees et al., 2020; Akçayır & Akçayır, 2017).

Trotz des Potenzials von AR für den MINT-Unterricht wird die Technologie in Schulen bislang selten eingesetzt, was mehrere Ursachen hat (Radu et al., 2022; Al-Ansi et al., 2023; Kljun et al., 2020). Zum einen mangelt es an qualitativ hochwertigen AR-Applikationen, die für den Unterricht geeignet sind und keine ungenauen oder fehlerhaften fachlichen Inhalte präsentieren (Czerkawski & Berti, 2021; Perifanou et al., 2023; Schmidthaler et al., 2023). Zum anderen gibt es an vielen Schulen technische Barrieren wie fehlende Tablets und Smartphone-Verbote, die den Einsatz persönlicher Geräte der Schüler*innen erschweren (Tan et al., 2023; Perifanou et al., 2023; Freese et al., 2021; Alalwan et al., 2020). Diese externen Hindernisse der Technologieintegration, die durch technische Ausstattung und organisatorische Faktoren wie Zeit oder Unterstützungsangebote bedingt sind, bezeichnet Ertmer (1999) als „Hindernisse erster Ordnung“. Weitere Barrieren, die in den Einstellungen und Kompetenzen der Lehrpersonen liegen, werden von Ertmer (1999) als „Hindernisse zweiter Ordnung“ bezeichnet; der Einsatz von AR hängt demnach stark von der Bereitschaft und den Fähigkeiten der Lehrpersonen ab (Tondeur et al., 2017; Perifanou et al., 2023).

Studien zeigen allerdings, dass (angehende) Lehrpersonen selten praktische Erfahrungen mit AR haben und diese meist nur aus dem Konsum von AR-Applikationen im Gaming-Bereich wie Pokémon GO (Niantic, Inc., 2016) kennen, nicht jedoch aus der Anwendung im Unterricht (Belda-Medina & Calvo-Ferrer, 2022; Ga et al., 2024; Trust et al., 2021;

Freese et al., 2021; Heintz et al., 2021). Zudem wird AR in der Lehrpersonenbildung bislang nur selten thematisiert (Avila-Garzon et al., 2021; Mena et al., 2023).

2.4 Lehrpersonenkompetenzen im Umgang mit Augmented Reality

Für einen effektiven Einsatz von AR im Fachunterricht müssen Lehrpersonen nicht nur in der Lage sein, die Applikationen technisch zu bedienen, sondern benötigen gemäß dem TPACK-Modell (siehe Abschnitt 2.1) auch technologiebezogene fachdidaktische Kompetenzen (Koehler & Mishra, 2009; Buchner & Zumbach, 2020a, 2020b; da Silva et al., 2018). Der Einsatz von AR-Applikationen im Unterricht lässt sich in bestehende digitale Kompetenzrahmen für die Lehrpersonenbildung integrieren, etwa in das „European Framework for the Digital Competence of Educators“ (DigCompEdu; Redecker, 2017) oder in spezifischere Modelle für die Naturwissenschaften wie DiKoLAN („Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften“; Thoms et al., 2022; Becker et al., 2020; von Kotzebue et al., 2021). DiKoLAN bietet eine strukturierte Orientierung hinsichtlich der digitalen Kompetenzen für angehende Naturwissenschaftslehrpersonen und umfasst dabei auch die Nutzung von Simulationen und Modellen, wozu Augmented Reality zählt.

Noch spezifischer beschäftigten sich Nikou et al. (2022, 2023) mit den Lehrpersonenkompetenzen im Umgang mit Augmented Reality. Sie schlagen in ihrer TARC-Skala (teachers augmented reality competences) drei Kompetenzbereiche mit entsprechenden Subdimensionen vor (siehe Tab. 1) und entwickelten einen dazu passenden Fragebogen.

Tab. 1. TARC-Skala (Nikou et al., 2022, 2023)

Create	Design, develop and modify (DDM): Lehrpersonen benötigen technisches Wissen, um AR-Applikationen zu Lerninhalten gestalten, entwickeln und verändern zu können.
Use	Pedagogy, teaching, assessment and feedback (PTAF): Lehrpersonen benötigen pädagogisches Wissen, um AR-Applikationen lernwirksam in ihrem Unterricht einsetzen zu können.
Manage	Search, evaluate and organize (SEO): Lehrpersonen sollen geeignete AR-Applikationen finden, evaluieren und organisieren können.
	Ethics and safety (ES): Lehrpersonen sollen eine ethische und sichere Nutzung von AR-Applikationen sicherstellen und kontrollieren können.

Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass (angehende) Lehrpersonen dem Einsatz von AR im Unterricht grundsätzlich positiv gegenüberstehen, sich jedoch häufig nicht kompetent fühlen, AR-Applikationen zu erstellen, anzuwenden oder zu verwalten (Nikou et al., 2024; Zraggen, 2023; Perifanou et al., 2023; Tzima et al., 2019; Belda-Medina & Calvo-Ferrer, 2022). Dies könnte auf einen Mangel an praktischer Erfahrung zurückzuführen sein, da viele Lehrpersonen bislang primär als Rezipient*innen – etwa im Kontext von AR-Spielen – mit der Technologie in Berührung kamen (siehe Abschnitt 2.3; Belda-Medina & Calvo-Ferrer, 2022; Ga et al., 2024).

Studien deuten außerdem darauf hin, dass (angehende) Lehrpersonen ihr Wissen in den Basisdomänen des TPACK-Modells (CK, TK, PK) tendenziell höher einschätzen als in den integrativen Bereichen. Beispielsweise zeigte sich bei Belda-Medina & Calvo-Ferrer (2022) bei angehenden Sprachlehrpersonen eine geringe Selbstwirksamkeit im technologiebezogenen pädagogischen Wissen (TPK), insbesondere bei der Auswahl geeigneter Lehrmethoden für den Einsatz von AR im Unterricht. In einer Studie mit berufstätigen Physiklehrpersonen der Sekundarstufe I kamen Freese et al. (2023) zu vergleichbaren Ergebnissen. Im Rahmen einer Weiterbildung entwickelten die Lehrpersonen ein AR-Experiment, anhand dessen Expert*innen ihre Kompetenzen im Hinblick auf TK, TCK, TPK und TPACK beurteilten. Dabei erhielt der TPK-Teilbereich zum didaktischen Einsatz des AR-Experiments die niedrigste Bewertung.

Die Studie von Ga et al. (2024) mit angehenden Primarlehrpersonen im naturwissenschaftlichen Bereich verdeutlichte, dass eine unzureichende Berücksichtigung relevanter TPACK-Elemente in der Unterrichtsplanung mit AR oder Virtual Reality (VR) zu signifikanten Problemen im Unterricht führen und eine intensive Reflexion dieser Defizite erforderlich machen kann. Darüber hinaus stellten die Autoren fest, dass die Lernvoraussetzungen der Schüler*innen bei der Planung oft vernachlässigt wurden. Dieser Befund wird durch die Ergebnisse von Tan et al. (2023) gestützt, welche zeigen konnten, dass Primarlehrpersonen tendenziell das Lernpotenzial von Augmented Reality stärker gewichten als die Bedürfnisse und Voraussetzungen der Lernenden.

2.5 Forschungslücke

Obwohl das TPACK-Modell grundsätzlich kontextspezifisch angelegt ist, also die Integration konkreter Technologien in spezifische Fachkontexte betont (siehe Abschnitt 2.1; Koehler & Mishra, 2009; Schmid et al., 2020), konzentrieren sich bisherige Studien nur selten auf einzelne Fachbereiche wie die MINT-Fächer oder auf den Einsatz spezifischer Technologien wie Augmented Reality (Chai et al., 2016; Luik et al., 2017; Mouza, 2016; Voogt et al., 2012). In Bezug auf Augmented Reality kommt hinzu, dass sich ein Großteil der Forschung auf Lernende konzentriert. Studien, die (angehende) Lehrpersonen in den Blick nehmen, sind demgegenüber deutlich seltener, wobei insbesondere berufstätige Lehrpersonen in der Forschungsliteratur unterrepräsentiert sind (Akçayır & Akçayır, 2017; Garzón et al., 2019; Alalwan et al., 2020; Arici et al., 2021; Heintz et al., 2021; Wang & Li, 2024; Mena et al., 2023). Insgesamt liegt somit bislang nur eine begrenzte empirische Basis zum Umgang von (angehenden) Lehrpersonen mit Augmented Reality vor (siehe Abschnitt 2.4). Erste Befunde deuten jedoch darauf hin, dass insbesondere im Bereich des technologiebezogenen pädagogischen Wissens (TPK) Herausforderungen bestehen (Belda-Medina & Calvo-Ferrer, 2022; Freese et al.,

2023). Außerdem unterstreichen aktuelle Studien die Notwendigkeit, TPACK-Elemente gezielt in die Unterrichtsplanung zu integrieren, um eine sinnvolle pädagogische Nutzung von Augmented Reality zu ermöglichen (Ga et al., 2024; Tan et al., 2023).

Ein weiterer kritischer Punkt bisheriger Studien betrifft die Messung von TPACK. Zwar greifen viele Studien auf Selbsteinschätzungen zurück (Akyuz, 2018; Willermark, 2017; Archambault, 2016; Koehler et al., 2011), doch zeigen Vergleichsstudien, dass diese nur bedingt mit objektiven Verfahren wie Leistungstests oder Beobachtungen übereinstimmen. So lassen sich unter anderem Diskrepanzen zwischen subjektiver Einschätzung und tatsächlich beobachtetem Handeln im Unterricht nachweisen (Gonzalez & Ruiz, 2016; Maderick et al., 2016; Stinken-Rösner et al., 2023).

Insgesamt lässt sich eine doppelte Forschungslücke identifizieren, die mit der vorliegenden Studie gezielt adressiert wird. Erstens fehlt es an kontextspezifischen Untersuchungen zu den Kompetenzen von (angehenden) Lehrpersonen im Umgang mit Augmented Reality im MINT-Unterricht – insbesondere unter Einbezug berufstätiger Lehrpersonen. Hierfür werden sowohl angehende als auch berufstätige Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II zu konkreten AR-Applikationen mit MINT-Themen befragt. Zweitens mangelt es an objektiven Verfahren zur Erfassung von TPACK. Um diesem methodischen Defizit zu begegnen, orientiert sich die Studie am Vorgehen von Vignettenstudien zur Erhebung der professionellen Wahrnehmung (siehe Abschnitt 2.2; vgl. Brovelli et al., 2019; Billion-Kramer et al., 2020; Atanasova et al., 2023). Anstelle der Beurteilung von Unterrichtssituationsbeschreibungen wird eine Unterrichtsplanungssituation simuliert, in welcher die (angehenden) Lehrpersonen AR-Applikationen testen, aus fachdidaktischer und mediendidaktischer Sicht beurteilen und diese in eine Unterrichtseinheit einplanen. Dies entspricht in der TARC-Skala nach Nikou et al. (2022; 2023) den Bereichen Use und Manage (siehe Abschnitt 2.4). Untersucht wird, auf welche TPACK-Wissensbereiche (siehe Abschnitt 2.1; Koehler & Mishra, 2009) sich (angehende) Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II bei der Bewertung und Auswahl von sowie Planung mit AR-Applikationen mit MINT-Themen beziehen. Trotz relevanter Erweiterungen durch das DPack-Modell (Huyer et al., 2019; Thyssen et al., 2023) wird in dieser Studie das etablierte TPACK-Modell verwendet, da es über validierte Instrumente verfügt und breite Anschlussfähigkeit in der Forschung bietet.

Angesichts des bislang begrenzten Forschungsstandes zum Thema dieses Artikels wird auf die Formulierung von Hypothesen verzichtet und stattdessen explorativ vorgegangen. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht folgende Forschungsfrage:

Auf welche TPACK-Wissensbereiche und damit verbundene Themen fokussieren sich (angehende) Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II bei der Bewertung und Auswahl von sowie Unterrichtsplanung mit Augmented-Reality-Applikationen bei verschiedenen MINT-Applikationen?

Untersucht werden sowohl angehende als auch ausgebildete Lehrpersonen, wobei der Schwerpunkt auf den angehenden Lehrpersonen liegt, um in weiterführenden Analysen Veränderungen im Verlauf der Professionalisierung systematisch nachvollziehen zu können.

3 Design und Methoden

3.1 Wahl der Augmented-Reality-Applikationen für die Studie

Um eine applikations- und fächerübergreifende Aussage über den Fokus von (angehenden) Lehrpersonen bei der Beurteilung von AR-Applikationen mit MINT-Themen treffen zu können, wurden sechs AR-Applikationen zu drei verschiedenen MINT-Themen ausgewählt. Dabei sollten jeweils zwei Applikationen ein vergleichbares Thema abdecken, um fundierte Vergleiche und eine begründete Auswahl zu ermöglichen. Alle ausgewählten Applikationen sollten für den Einsatz im Unterricht auf der Sekundarstufe I und II geeignet sein. Hierfür mussten die Applikationen eine ausreichende Benutzerfreundlichkeit aufweisen, thematisch relevante Inhalte für die betrachteten Zielstufen vermitteln und in Deutsch verfügbar sein. Zudem sollte die Nutzung der Applikationen auch langfristig möglich sein.

Die Suche nach geeigneten AR-Applikationen erfolgte sowohl in wissenschaftlichen Publikationen als auch über den Google Play Store, den App Store und mithilfe der Internetsuchmaschine Google. Der bereits in Abschnitt 2.3 erwähnte Mangel an qualitativ hochwertigen AR-Applikationen für den Unterricht bestätigte sich auch bei dieser Recherche. Viele der gefundenen Applikationen wiesen eine unzureichende Benutzerfreundlichkeit auf, behandelten Inhalte, die für die Sekundarstufe I und II nicht relevant sind oder waren ausschließlich auf Englisch verfügbar. Zudem zeigte sich, dass zahlreiche Applikationen nicht langfristig verfügbar waren.

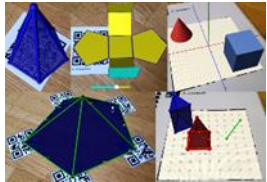
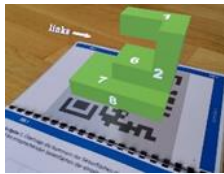
Aufgrund des Mangels an geeigneten Applikationen war es notwendig, für das Erreichen der angestrebten Anzahl von sechs thematisch gepaarten AR-Applikationen eigene (Weiter-)Entwicklungen und Übersetzungen vorzunehmen. In Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern wurden zwei neue AR-Applikationen zu den Themen Stromkreis und Blutgruppenverträglichkeit entwickelt sowie eine bestehende Applikation zum Thema Stromkreis weiterentwickelt. Zwei AR-Applikationen zur Raumgeometrie wurden in Kooperation mit den Entwicklerteams aus der Türkei und Brasilien ins Deutsche übersetzt.

Alle (Weiter-)Entwicklungen und Übersetzungen erfolgten auf der Grundlage fachdidaktischer und mediendidaktischer Prinzipien sowie gemäß den in der Studie definierten Auswahlkriterien (zwei Applikationen pro Thema, ausreichende Benutzerfreundlichkeit, zielstufenrelevante Inhalte, deutsche Sprachversion und langfristige Verfügbarkeit). Die begrenzte Auswahl an verfügbaren Applikationen erlaubte keine gezielte Kontrolle zusätzlicher Aspekte, führte

jedoch zu einer Vielfalt an Funktionen und Einsatzmöglichkeiten, die reale Bedingungen widerspiegelt und es ermöglicht, authentische Einschätzungen der Lehrpersonen zu relevanten Aspekten zu gewinnen. Um Unterschiede zwischen den Fächern untersuchen zu können, wurde bei den neu entwickelten Applikationen darauf geachtet, dass pro Fach jeweils eine Applikation über einen größeren Funktionsumfang verfügt (AR Papierstromkreise, Insight Heart, Sólidos RA), während die andere stärker auf einen spezifischen Unterrichtskontext zugeschnitten ist (AR Stromkreismodelle, Blutgruppenverträglichkeit, SPATIAL AR). Für die Studienteilnehmenden war nicht erkennbar, dass ein Teil der Applikationen vom Forschungsteam (weiter-)entwickelt wurde.

Tabelle **Tab. 2** zeigt Screenshots der in der Studie verwendeten AR-Applikationen. Eine detailliertere Übersicht mit Kurzbeschreibungen findet sich im Appendix 1.

Tab. 2. Screenshots der in der Studie verwendeten AR-Applikationen

Physik	Biologie	Mathematik
 (AR Stromkreismodelle; Schmid et al., 2018)	 (Blutgruppenverträglichkeit; Idee von Vivien Wilzbach)	 (Sólidos RA; Amorim & de Oliveira Freitas, 2023)
 (AR Papierstromkreise)	 (Insight Heart; ANIMA RES, 2022)	 (SPATIAL AR; Özçakır & Çakıroğlu, 2021a, 2021b)

3.2 Rahmen und zeitlicher Ablauf der Untersuchung

Die Studie orientiert sich am methodischen Vorgehen von Vignettenstudien zur Erhebung professioneller Wahrnehmung (Brovelli et al., 2019; Billion-Kramer et al., 2020; Atanasova et al., 2023). Anstelle der Beurteilung schriftlich beschriebener Unterrichtssituationen wurde eine Planungssituation simuliert, in der (angehenden) Lehrpersonen zwei AR-Applikationen zu einem MINT-Thema (Raumgeometrie, Blutgruppen/Herz oder Stromkreis; siehe Abschnitt 3.1) testen, beurteilen und in eine Unterrichtseinheit einplanen sollten. Die Evaluation erfolgte vor Ort mittels eines Online-Fragebogens. Die Teilnehmenden wurden instruiert, sich vorzustellen, dass sie eine Unterrichtseinheit zum jeweiligen Thema vorbereiten und dabei auf zwei AR-Applikationen stoßen. Vor dem Testen jeder Applikation wurde ein kurzes Erklärvideo gezeigt, das in die Nutzung der jeweiligen Applikation einführte, jedoch keine inhaltlichen Hinweise gab. Anschließend hatten die Teilnehmenden pro Applikation 15-20 Minuten Zeit, um diese zu testen und parallel dazu eine erste Einschätzung vorzunehmen.¹ In Anlehnung an Todorova et al. (2017), die darauf hinweisen, dass vorgegebene Items in Tests zur professionellen Wahrnehmung die Aufmerksamkeit der Teilnehmenden selektiv beeinflussen können, wurde bei allen Prompts der Applikationsbeurteilung ein offenes Antwortformat gewählt.

Nach dem Testen und ersten Beurteilen beider Applikationen wurden die (angehenden) Lehrpersonen aufgefordert, sich unter idealen Bedingungen für eine der beiden AR-Applikationen zu entscheiden und ihre Wahl zu begründen.² Im Anschluss daran wurden die Teilnehmenden gebeten, zu beschreiben, wie sie die gewählte AR-Applikation unter idealen Bedingungen im Unterricht einsetzen würden.³

Nach dieser idealtypischen Planungssituation folgten zwei weitere Aufgaben unter realen Bedingungen des schulischen Alltags. Da die tatsächlichen Voraussetzungen für den Einsatz von AR-Applikationen an Schulen teils stark variieren (siehe Abschnitt 2.3), wurde dieser Teil integriert, um auch kontextbezogenes Wissen im Sinne des TPACK-Modells

¹ Prompt: „Notieren Sie in ganzen Sätzen, was Ihnen aus fachdidaktischer und mediendidaktischer Sicht an der Augmented-Reality-App auffällt. Achten Sie dabei insbesondere auf Merkmale der potenziell kognitiven und motivationalen Lernunterstützung der App. Uns interessieren alle Bemerkungen, egal ob neutral, positiv oder negativ. Bitte begründen Sie Ihre Bemerkungen wo nötig.“

² Prompt: „Wenn Sie sich unter idealen Bedingungen (Tablets und Zubehörmaterial stehen zur Verfügung, passende Klassenstufe etc.) für eine der zwei Augmented-Reality-Apps entscheiden müssten, welche würden Sie wählen? Begründen Sie Ihre Entscheidung in ganzen Sätzen.“

³ Prompt: „Beschreiben Sie in ganzen Sätzen und möglichst ausführlich, wie Sie den Unterricht mit der gewählten App unter idealen Bedingungen (Tablets und Zubehörmaterial stehen zur Verfügung, passende Klassenstufe etc.) gestalten würden.“

zu berücksichtigen. Hierzu erhielten die Teilnehmenden zunächst zusätzliche Informationen zu jeder Applikation, darunter Angaben zu Kosten, benötigtem Zubehör, Kompatibilität mit verschiedenen Betriebssystemen und zur allgemeinen Verfügbarkeit. Auf dieser Basis sollten sie eine Wahl treffen – sie konnten sich für eine, beide oder keine der Apps entscheiden⁴ und anschließend beschreiben, wie sich ihre Unterrichtsplanung unter realen Bedingungen von jener unter idealen Bedingungen unterscheidet⁵.

Die Test- und Bewertungsphase der AR-Applikationen dauerte insgesamt etwa 60 Minuten. Inklusive Einführung in die Studie sowie abschließender Fragen betrug die Gesamtdauer der Erhebung in den Fächern Mathematik und Biologie ca. 90 Minuten. In der Physik nahm die Erhebung etwa 100 Minuten in Anspruch, da zusätzlich ein PCK-Test zum Thema Stromkreis (Schödl, 2018) durchgeführt wurde.

3.3 Stichprobe

Die Studie untersucht Lehrpersonen mit unterschiedlichem Ausbildungsstand, legt jedoch den Schwerpunkt auf angehende Lehrpersonen, um die Entwicklungen in ihrer Professionalisierung systematisch nachzuvollziehen und daraus gezielte Impulse für die Weiterentwicklung von Aus- und Weiterbildung abzuleiten. Insgesamt nahmen $N = 418$ (angehende) MINT-Lehrpersonen der Sekundarstufen I und II an der Studie teil. Die Zusammensetzung der Teilstichproben nach Ausbildungsstand und Zielstufe ist in Tab. 3 dargestellt. In der Schweiz absolvieren Lehrpersonen der Sekundarstufe I die Ausbildung an Pädagogischen Hochschulen, während Lehrpersonen der Sekundarstufe II über einen fachwissenschaftlichen Masterabschluss verfügen und sich im Rahmen eines ergänzenden Studiums für das Lehrdiplom an Maturitätsschulen qualifizieren. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmenden betrug $M = 29.5$ Jahre ($SD = 10.9$). Der Anteil weiblicher Teilnehmenden lag bei 47.6 %, der männlicher bei 52.4 %. Die angehenden Lehrpersonen wurden im Rahmen von Modulveranstaltungen an den Pädagogischen Hochschulen Luzern, Zürich, Bern und Thurgau befragt. Berufstätige Lehrpersonen nahmen im Rahmen kostenloser Weiterbildungsveranstaltungen zum Thema „Augmented Reality in MINT-Fächern auf der Sekundarstufe I und II“ an der Studie teil, die in neun Deutschschweizer Kantonen (Luzern, Zürich, Schwyz, Bern, Aargau, Glarus, Zug, St. Gallen und Thurgau) angeboten wurden. Die Weiterbildung war grundsätzlich freiwillig, wurde an einigen Schulen jedoch als schulinterne Fortbildung angeboten, wodurch auch Lehrpersonen zur Teilnahme motiviert wurden, die sich sonst möglicherweise nicht angemeldet hätten. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Teilstichprobe der ausgebildeten Lehrpersonen im Vergleich zu der der angehenden Lehrpersonen einen höheren Anteil an besonders am Thema interessierten Personen aufweist.

Da die Beurteilung von AR-Applikationen mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist, bewerteten die Teilnehmenden pro Studienteilnahme nur zwei der insgesamt sechs AR-Applikationen. Von den Teilnehmenden beurteilten $n = 123$ bei ihrer ersten Teilnahme die Mathematik-Applikationen, $n = 157$ die Biologie-Applikationen und $n = 138$ die Physik-Applikationen. $n = 45$ der insgesamt $N = 418$ Personen nahmen zweimal und $n = 11$ Personen dreimal an der Studie teil. Diese Teilnehmenden bewerteten somit vier bzw. alle sechs AR-Applikationen.

Tab. 3. Übersicht über die Teilstichproben nach Ausbildungsstand und Zielstufe ($N = 418$)

Ausbildungsstand und Zielstufe	Häufigkeit	Prozent
In der Ausbildung zur Sekundarlehrperson (Sek I)	305	73.0
Ausgebildete Sekundarlehrperson (Sek I)	57	13.6
In der Ausbildung zur Lehrperson nachobligatorische Bildung (Sek II, Tertiärstufe)	6	1.4
Ausgebildete Lehrperson nachobligatorische Bildung (Sek II, Tertiärstufe)	50	12.0

3.4 Datenauswertung

Die Textantworten der (angehenden) Lehrpersonen wurden anhand einer qualitativen Inhaltsanalyse nach dem deduktiv-induktiven Vorgehen von Kuckartz und Rädiker (2022) ausgewertet. Grundlage der Analyse bildete ein Kategoriensystem, das Aussagen den Wissensbereichen des TPACK-Modells zuordnet. Das System dient der thematischen Einordnung der von den Lehrpersonen geäußerten Aspekte, ohne deren Qualität zu bewerten. Nicht codiert wurden Aussagen, die keinem TPACK-Bereich zugeordnet werden konnten, etwa aufgrund fehlender wissensbasierter Begründungen. Die Codiereinheit war eine Sinneinheit, die einen inhaltlich abgeschlossenen Aspekt umfasst und eindeutig einer Subkategorie zugeordnet werden kann. Eine Sinneinheit konnte dabei aus einem Teilsatz, einem vollständigen Satz oder mehreren Sätzen bestehen. Jede Sinneinheit wurde einer Subkategorie zugewiesen; Mehrfachcodierungen erfolgten nur bei Einschüben, die sich klar auf mehrere Subkategorien bezogen.

Zur Überprüfung der Reliabilität der Codierungen wurden in jedem Fachgebiet von zwei Codiererinnen unabhängig voneinander ausgewählte Fälle codiert. Anschließend verglichen sie ihre Ergebnisse und diskutierten Abweichungen, um Konsens über uneinheitlich codierte Textsegmente zu erzielen und die Kategorienbeschreibungen zu schärfen. Dieser Prozess wurde mehrfach wiederholt, bis eine zufriedenstellende Inter-coder-Übereinstimmung erreicht war.

⁴ Prompt: „Überlegen Sie sich, welche der zwei Augmented-Reality-Apps Sie unter realen Bedingungen (in Ihrem Arbeitsalltag) einsetzen würden. Begründen Sie Ihre Entscheidung in ganzen Sätzen.“

⁵ Prompt: „Unter realen Bedingungen (in Ihrem Arbeitsalltag) würden Sie die App X einsetzen. Beschreiben Sie in ganzen Sätzen und möglichst ausführlich, inwiefern sich Ihre Unterrichtsplanung unter realen Bedingungen (in Ihrem Arbeitsalltag) von der oben beschriebenen Unterrichtseinheit unter idealen Bedingungen unterscheidet.“

Eine Person war in allen Fächern am Codierprozess beteiligt und stellte dadurch die Vergleichbarkeit der Codierungen zwischen den Fächern sicher.

Auf Basis des entwickelten Kategoriensystems wurde untersucht, auf welche TPACK-Wissensbereiche und deren Unterkategorien sich die (angehenden) Lehrpersonen bei der Bewertung, Auswahl und Planung mit AR-Applikationen besonders häufig oder selten bezogen. Dies ermöglicht Rückschlüsse darauf, welche Wissensbereiche aktuell im Fokus stehen und welche im Rahmen von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen gezielt gestärkt werden sollten. Die quantitative Auswertung erfolgte anhand der Häufigkeiten der codierten Segmente und dem Anteil Personen mit mindestens einem Code pro Kategorie. Zunächst wurden die absoluten und relativen Häufigkeiten der Bezugnahmen auf die TPACK-Wissensbereiche, die Mittelwerte und der Anteil Personen mit mindestens einem Code betrachtet, um den thematischen Fokus der Teilnehmenden zu analysieren. Anschließend wurde geprüft, ob sich die inhaltlichen Schwerpunkte je nach Fach unterscheiden. Da die Bewertungspaarungen thematisch eng verwoben sind (zwei thematisch ähnliche Applikationen pro Fach), erfolgte die Auswertung nicht auf Ebene einzelner Applikationen, sondern aggregiert nach Fach. Da die Verteilungen der Daten nicht normalverteilt waren und Ausreißer enthielten, wurden die Gruppenvergleiche mithilfe nichtparametrischer Verfahren durchgeführt, konkret mit Kruskal-Wallis-Tests (inkl. Post-hoc-Vergleiche mittels Dunn-Tests mit Bonferroni-Korrektur) und zweiseitigen Wilcoxon-Tests.

4 Ergebnisse

4.1 Kategoriensystem zur Beurteilung von Augmented-Reality-Applikationen mit MINT-Themen

Das Kategoriensystem zur Beurteilung von AR-Applikationen mit MINT-Themen wurde auf Grundlage einer qualitativen Inhaltsanalyse nach dem deduktiv-induktiven Vorgehen von Kuckartz und Rädiker (2022) entwickelt. Die acht Wissensbereiche des TPACK-Modells (Koehler & Mishra, 2009; Mishra & Koehler, 2006; Rosenberg & Koehler, 2015; Mishra, 2019; Mishra & Warr, 2021) bilden die Hauptkategorien des Kategoriensystems. Die Subkategorien wurden sowohl literaturbasiert als auch induktiv aus den Antworten von 48 ausgewählten Fällen abgeleitet, was mehr als 10 % der Fälle entspricht. Das resultierende Kategoriensystem umfasst acht Hauptkategorien, 26 Subkategorien auf erster Ebene, 12 Subkategorien auf zweiter Ebene sowie fünf Subkategorien auf dritter Ebene. Besonders stark ausdifferenziert wurde entsprechend dem thematischen Fokus der Studie die Hauptkategorie des fachdidaktischen Wissens (PCK). Alle Kategorien sind im Appendix 2 mit inhaltlichen Beschreibungen dokumentiert. Dabei handelt es sich um eine Kurzfassung des ursprünglich 30-seitigen Codebuchs, das zusätzliche Beispiele, Abgrenzungen zu verwandten Kategorien, sowie Anwendungshinweise enthält. Die Codierung erfolgte auf der untersten Ebene der Subkategorien (insgesamt 38 Kategorien), die im Appendix 2 jeweils durch ein Beispiel kenntlich gemacht ist.

Die Subkategorien der Wissensbereiche technologisches Wissen (TK), Kontextwissen (XK), technologiebezogenes pädagogisches Wissen (TPK) und technologiebezogenes fachliches Wissen (TCK) wurden auf Grundlage der Beschreibungen von Schmid et al. (2020) gebildet, die sich ihrerseits auf die Originalliteratur des TPACK-Modells stützen (Mishra & Koehler, 2006; Mishra, 2019; Rosenberg & Koehler, 2015). Für die weitere Ausdifferenzierung der Subkategorien wurde ergänzend folgende Literatur herangezogen: DIN EN ISO 9241-210:2020-03 (2020), DIN EN ISO 9241-11:2018-11 (2018), Nielsen (2012) und Tuli & Mantri (2020) für TK, Porras-Hernández & Salinas-Amescua (2013) für XK sowie Mayer (2020) für TPK. Die Subkategorien des pädagogischen Wissens (PK) basieren auf der Konzeption pädagogisch-psychologischen Wissens nach Marx et al. (2014, 2017). Das fachliche Inhaltswissen (CK) wurde gemäß der Taxonomie von Anderson & Kratwohl (2001) in drei Subkategorien unterteilt: Fakten, Fertigkeiten und Konzepte. Die Wissensart Metakognition, die sich auf das Wissen über eigene Kognitionen und Problemlösestrategien bezieht, spielte bei der Analyse der 48 Fälle nur eine untergeordnete Rolle und wurde daher nicht als eigenständige Subkategorie berücksichtigt.

Im Bereich TCK wurde auf Basis der 48 analysierten Beispielfälle eine zusätzliche Subkategorie eingeführt: „3.2. Wissen über Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen“. Der Anlass hierfür war, dass in zahlreichen Fällen Potenziale oder Einschränkungen der AR-Applikationen im Hinblick auf fachliche Inhalte thematisiert wurden, beispielsweise: „Es gibt nur zwei Buchsen und eine Doppelbuchse für den ganzen Aufbau. Man kann also nicht an mehreren Stellen die Spannung und die Stromstärke messen ohne Buchsen wieder einbauen zu müssen und ggf. den Stromkreislauf wieder neu scannen zu müssen.“ (280, Pos. 17). Solche Aussagen beziehen sich sowohl auf den fachlichen Gehalt der Applikation (CK) als auch auf deren technische Funktionalitäten (TK), ohne jedoch pädagogische Aspekte (PK) zu adressieren. Daher wurde die neue Subkategorie dem Bereich TCK zugeordnet. Es ist dabei zu beachten, dass unter TK das Wissen über digitale Medien und Technologien verstanden wird (vgl. Kategorienbeschreibung im Appendix 2). Im Kontext der vorliegenden Studie umfasst dies die AR-Applikationen. Aussagen, die sich hingegen auf Wissen über technische Experimente, beispielsweise den Umgang mit Messgeräten, beziehen, werden CK zugeordnet, da sie den fachinhaltlichen Aspekt der Applikation betreffen. Diese Unterscheidung war notwendig, da andernfalls im Fach Physik aufgrund des Themas Stromkreise der AR-Applikationen deutlich mehr Codierungen unter TK erfolgt wären, was einen Fächervergleich erschwert hätte.

Die erste Ebene der Subkategorien im Bereich des fachdidaktischen Wissens (PCK) orientiert sich an der COACTIV-Studie, in der PCK in drei zentrale Teilbereiche untergliedert wird: Wissen über das Potenzial von Aufgaben, Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen sowie Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten (Baumert et al., 2004; Baumert & Kunter, 2006; Krauss et al., 2008; Baumert & Kunter, 2011; Kunter et

al., 2011). Für die weiterführende Ausdifferenzierung der Subkategorien wurden zusätzliche theoretische Bezüge herangezogen: Ainsworth (1999) für multiple Repräsentationen, Bruner (1974) für Repräsentationsformen sowie Henze et al. (2007), Meisert (2008), Upmeyer zu Belzen & Krüger (2010) und van Driel & Verloop (2001) für die Modellkompetenz. Diese wurde in die Teilbereiche Modellwissen, Modellarbeit und Modellverständnis unterteilt. Bei der Analyse der 48 Beispielfälle zeigte sich jedoch, dass Modellwissen und Modellarbeit in den vorliegenden Daten nicht klar voneinander abgrenzbar sind. Daher wurden beide Konzepte zu einer gemeinsamen Subkategorie zusammengefasst. Die Subkategorien im Bereich des technologiebezogenen fachdidaktischen Wissens (TPACK) wurden analog zur Struktur von PCK gebildet und basieren ebenfalls auf der COACTIV-Studie (Baumert & Kunter, 2006; Krauss et al., 2008; Kunter et al., 2011; Baumert & Kunter, 2011; Baumert et al., 2004). Für jede Subkategorie wurde zusätzlich ein medienpezifischer Bezug ergänzt, etwa in der Formulierung: „8.1 Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium“.

Zur Überprüfung der Interdecoder-Übereinstimmung wurde für jedes Fach auf Basis von zehn Fällen der Kappa-Koeffizient (κ_n) nach Brennan und Prediger (1981) in MAXQDA berechnet. Dieses Vorgehen entspricht dem von Kuckartz und Rädiker (2022) empfohlenen Ansatz zur Überprüfung der Interdecoder-Übereinstimmung in großen Codierprojekten, bei dem eine Stichprobe ausgewählter Fälle und nicht der gesamte Datensatz doppelt codiert wird. Zusätzlich wurde in R mit dem Paket irrCAC Gwet's AC1 berechnet. Die erzielten Übereinstimmungswerte auf Ebene der Haupt- und Subkategorien sind in Tab. 4 dargestellt. Nach der Einschätzung von Wirtz und Casper (2002) sind die Werte als knapp oder nicht vollständig zufriedenstellend einzustufen. Trotz eines ausführlichen Codebuchs, klar definierter Codierregeln und einer intensiven Schulung der Codierenden konnte das Übereinstimmungsniveau nicht weiter gesteigert werden. Als maßgeblicher erschwerender Faktor erwies sich die hohe Anzahl an Kategorien, die die Codierung komplex gestaltete. Die differenzierte Kategoriensystematik ist jedoch notwendig, um der Forschungsfrage gerecht zu werden und einen gehaltvollen Beitrag zur fachdidaktischen Diskussion zu leisten. Zur Sicherstellung einer möglichst hohen Reliabilität bei der arbeitsteiligen Codierung der restlichen Fälle wurden mehrdeutig interpretierbare Textsegmente konsensual codiert. Zusätzlich wurden nach der Codierung des gesamten Datensatzes alle Segmente überprüft, die seltenen Subkategorien zugeordnet waren, um fehlerhafte Codierungen zu korrigieren.

Tab. 4. Interdecoder-Übereinstimmung bei den Fächern nach Haupt- und Subkategorien

Kategorienebene	Mathematik	Biologie	Physik
Hauptkategorien	$\kappa_n = .63$, Gwet's AC1 = .54	$\kappa_n = .68$, Gwet's AC1 = .61	$\kappa_n = .73$, Gwet's AC1 = .69
Subkategorien	$\kappa_n = .63$, Gwet's AC1 = .52	$\kappa_n = .65$, Gwet's AC1 = .55	$\kappa_n = .67$, Gwet's AC1 = .57

4.2 Fokus (angehender) Lehrpersonen bei der Beurteilung von Augmented-Reality-Applikationen

Bei der Beurteilung von AR-Applikationen greifen (angehende) Lehrpersonen mit unterschiedlicher Häufigkeit auf die Wissensbereiche des TPACK-Modells zurück. AbbildungAbb. 3 zeigt die absoluten Häufigkeiten der Bezugnahme auf die jeweiligen Wissensbereiche. Betrachtet man alle Fächer und somit alle sechs untersuchten AR-Applikationen gemeinsam, so beziehen sich die Aussagen der (angehenden) Lehrpersonen am häufigsten auf die Wissensbereiche TPACK ($H_{7126} = 1349$, $h_{7126} = .189$), TPK ($H_{7126} = 1338$, $h_{7126} = .188$), PCK ($H_{7126} = 1287$, $h_{7126} = .181$), TK ($H_{7126} = 1170$, $h_{7126} = .164$) und PK ($H_{7126} = 1055$, $h_{7126} = .148$). Im mittleren Bereich liegen die Wissensbereiche TCK ($H_{7126} = 450$, $h_{7126} = .063$) und XK ($H_{7126} = 402$, $h_{7126} = .056$). Am seltensten wird auf das fachliche Inhaltswissen (CK) Bezug genommen ($H_{7126} = 75$, $h_{7126} = .011$). Betrachtet man statt der absoluten Codehäufigkeiten den Anteil der Personen mit mindestens einem Code in den TPACK-Wissensbereichen, zeigt sich ein ähnliches Muster (siehe Linie in AbbildungAbb. 3). Tabelle Tab. 5 ergänzt diese Darstellung und verdeutlicht, dass die (angehenden) Lehrpersonen in den TPACK-Wissensbereichen TPACK, TPK, PCK, TK und PK durchschnittlich die meisten Nennungen aufweisen ($M = 2.52$ bis $M = 3.23$). Beim Kontextwissen (XK) und beim technologiebezogenen fachlichen Wissen (TCK) liegt der Mittelwert hingegen lediglich bei etwa einer Aussage, während beim fachlichen Inhaltswissen (CK) im Durchschnitt nur 0.18 Nennungen erfolgen.

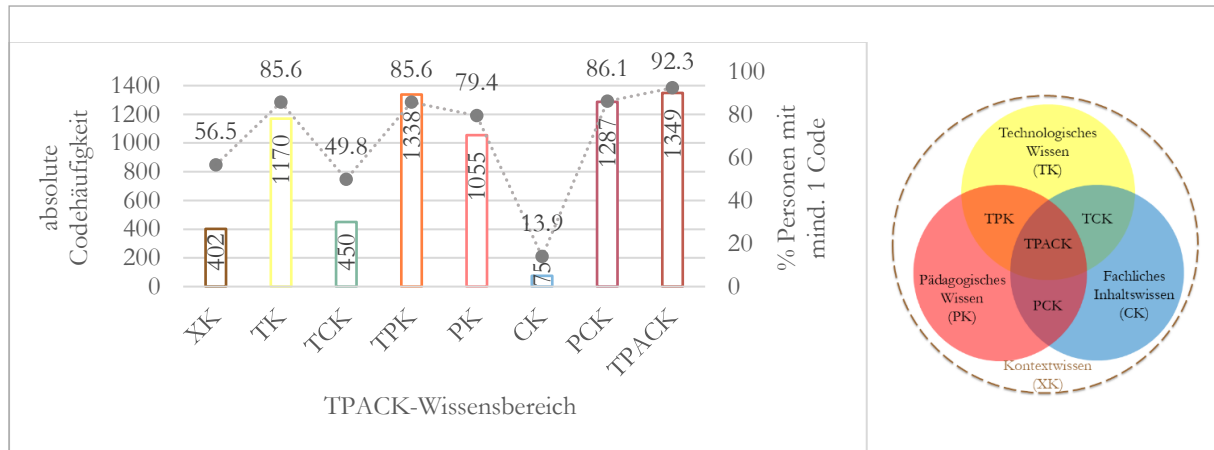


Abb. 3. Absolute Codehäufigkeit und Anteil Personen mit mindestens einem Code (%) in den TPACK-Wissensbereichen (Codes gesamt: 7126); TPACK-Modell nach Koehler & Mishra (2009) und Rosenberg & Koehler (2015), eigene Darstellung

Tab. 5. Deskriptive Statistiken der Codehäufigkeiten in den TPACK-Wissensbereichen

TPACK-Wissensbereich	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Kontextwissen (XK)	0	5	0.96	1.08
Technologisches Wissen (TK)	0	12	2.80	2.27
Technologiebezogenes fachliches Wissen (TCK)	0	9	1.08	1.54
Technologiebezogenes pädagogisches Wissen (TPK)	0	16	3.20	2.60
Pädagogisches Wissen (PK)	0	20	2.52	2.48
Fachliches Inhaltswissen (CK)	0	4	0.18	0.50
Fachdidaktisches Wissen (PCK)	0	16	3.08	2.52
Technologiebezogenes fachdidaktisches Wissen (TPACK)	0	11	3.23	2.20

Tabelle Tab. 6 listet die häufigsten und seltensten Subkategorien auf. Eine Subkategorie gilt als häufig, wenn sie mindestens 10 % der insgesamt 7126 vergebenen Codes ausmacht (relative Häufigkeit $\geq .10$), und als selten, wenn ihr Anteil 1 % oder weniger ausmacht (relative Häufigkeit $\leq .01$). Die absoluten und relativen Häufigkeiten sämtlicher Kategorien sowie deren Nummerierung und inhaltliche Beschreibung sind in Appendix 2 dokumentiert. Die Codierung erfolgte auf der untersten Ebene der Subkategorien, die im Appendix 2 daran erkennbar ist, dass dort ein Beispiel angegeben ist (insgesamt 38 Kategorien). Da die Hauptkategorien unterschiedlich viele Ebenen aufweisen, wurden die absoluten und relativen Häufigkeiten zusätzlich aggregiert, um Vergleiche auf höheren Ebenen der Kategorienstruktur zu ermöglichen. Die aggregierten Werte sind in den Tabellen mit ^a markiert. Ergänzend zu den absoluten und relativen Codehäufigkeiten wurden auch die Mittelwerte der Codehäufigkeiten pro Subkategorie sowie der Anteil der Personen untersucht, die mindestens einen Code in der jeweiligen Subkategorie aufwiesen. Während sich bei den Mittelwerten dieselben seltenen und häufigen Subkategorien zeigen, werden beim Anteil der Personen mit mindestens einem Code die Subkategorien Modellwissen und -arbeit (7.3.1.1.) zusätzlich als selten sowie Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten mit dem Medium (8.3) zusätzlich als häufig eingestuft. Da diese Abweichungen jedoch nur in einem einzelnen Kennwert auftreten und nicht durch die übrigen Analysen gestützt werden, werden sie in der Übersicht der seltenen und häufigen Subkategorien nicht gesondert ausgewiesen.

Tab. 6. Häufigste und seltenste Subkategorien geordnet nach TPACK-Wissensbereich

TPACK-Wissensbereich	Häufigste Subkategorien (relative Häufigkeit $b_{7126} \geq .10$)	Seltenste Subkategorien (relative Häufigkeit $b_{7126} \leq .01$)
XK		1.3. Kontextwissen auf der Makroebene ($H_{7126} = 5$, $b_{7126} = .001$)
TK	2.1. Anwendungswissen ($H_{7126} = 1169$, $b_{7126} = .164$)	2.2. Konzeptionelles Hintergrundwissen ($H_{7126} = 1$, $b_{7126} = .000$)
TCK		3.1. Wissen über Technologien in Hintergrunddisziplinen ($H_{7126} = 3$, $b_{7126} = .000$)
TPK	4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen ($H_{7126} = 1328$, $b_{7126} = .186$)	4.2. Medienerzieherisches/ Medienbildnerisches Wissen ($H_{7126} = 10$, $b_{7126} = .001$)
PK	5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen ($H_{7126} = 835$, $b_{7126} = .117$)	5.1. Wissen über Lernprozesse von Lernenden ($H_{7126} = 64$, $b_{7126} = .009$) 5.2. Wissen über Heterogenität der Lernenden ($H_{7126} = 9$, $b_{7126} = .001$) 5.4. Wissen über Lehr- und Lernziele ($H_{7126} = 2$, $b_{7126} = .000$) 5.5. Wissen über Führung von Lerngruppen ($H_{7126} = 4$, $b_{7126} = .001$) 5.6. Wissen über Kommunikation und Interaktion mit Lernenden ($H_{7126} = 1$, $b_{7126} = .000$) 5.8. Wissen über Individual- und Lernprozessdiagnostik ($H_{7126} = 4$, $b_{7126} = .001$)
CK		6.1. Fakten: Verbalisierbares Wissen ($H_{7126} = 54$, $b_{7126} = .008$) 6.2. Fertigkeiten: Implizites Handlungswissen ($H_{7126} = 20$, $b_{7126} = .003$) 6.3. Konzepte: Vernetztes Begriffswissen ($H_{7126} = 1$, $b_{7126} = .000$)
PCK	7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten ($H_{7126} = 745$, $b_{7126} = .105$) ^a	7.1.2. Nötiges Vorwissen ($H_{7126} = 58$, $b_{7126} = .008$) 7.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen ($H_{7126} = 56$, $b_{7126} = .008$) ^a 7.2.1. Interesse ($H_{7126} = 19$, $b_{7126} = .003$) 7.2.2. Typische Schwierigkeiten und Fehler ($H_{7126} = 30$, $b_{7126} = .004$) 7.2.3. Schüler*innenvorstellungen ($H_{7126} = 5$, $b_{7126} = .001$) 7.2.4. Diagnose von Schüler*innenwissen ($H_{7126} = 2$, $b_{7126} = .000$) 7.3.1.2. Modellverständnis ($H_{7126} = 7$, $b_{7126} = .001$) 7.3.2.1. Repräsentationsformen ($H_{7126} = 15$, $b_{7126} = .002$) 7.3.2.2. Multiple Repräsentationen ($H_{7126} = 34$, $b_{7126} = .005$)
TPACK	8.1. Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium ($H_{7126} = 920$, $b_{7126} = .129$)	8.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen in Verbindung mit dem Medium ($H_{7126} = 64$, $b_{7126} = .009$)

^a aus mehreren Subkategorien aggregierte Werte

Im Hinblick auf die Forschungsfrage zeigt sich, dass (angehende) Lehrpersonen bei der Beurteilung von AR-Applikationen unterschiedliche Wissensbereiche des TPACK-Modells heranziehen, dabei jedoch einzelne Bereiche verstärkt berücksichtigen. Die am häufigsten verwendeten Hauptkategorien sind - mit Ausnahme des technologischen Wissens (TK) – allesamt Schnittmengen mit pädagogischem Wissen (PK). Dies weist auf einen pädagogisch orientierten Fokus in der Bewertung von AR-Applikationen hin. Weniger stark berücksichtigt werden hingegen das fachliche Inhaltswissen (CK) sowie dessen Überschneidung mit dem technologischen Wissen (TCK). Auch das Kontextwissen spielt im Vergleich zu den übrigen Wissensbereichen eine untergeordnete Rolle.

Die häufigsten Subkategorien verdeutlichen die inhaltlichen Schwerpunkte, die (angehende) Lehrpersonen bei der Beurteilung von AR-Applikationen innerhalb der TPACK-Wissensbereiche setzen. Dabei stehen im Fokus: Kenntnisse zur Bedienung technischer Geräte (TK; 2.1.), Gestaltung und Wirkung digitaler Medien in Lehr-Lern-Kontexten (TPK; 4.1.), räumliche Gestaltung von Lernumgebungen sowie Auswahl und Aufbereitung von Lernmaterialien mit pädagogisch-psychologischem Fokus (PK; 5.7), Visualisierung fachlicher Inhalte, Qualität von Erklärungen sowie Planung und Begleitung fachbezogenen Unterrichts (PCK; 7.3) und der Beitrag von Aufgaben mit dem Medium zur erfolgreichen Wissenskonstruktion von Schüler*innen (TPACK; 8.1.).

In den Wissensbereichen pädagogisches Wissen (PK), fachliches Inhaltswissen (CK) und fachdidaktisches Wissen (PCK) werden zahlreiche Subkategorien von den (angehenden) Lehrpersonen nur selten thematisiert. Besonders auffällig ist, dass sowohl im Bereich PCK als auch bei TPACK Schüler*innenkognitionen und die Diagnose von Schüler*innenwissen kaum berücksichtigt werden. So wird beispielsweise selten auf typische Lernschwierigkeiten oder Feh-

ler der Schüler*innen (7.2.2.) eingegangen. Ebenfalls wenig Beachtung finden übergeordnete Kategorien auf der Metaebene: Dazu zählen das Kontextwissen auf der Makroebene, etwa zu bildungspolitischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen (1.3.), konzeptionelles Hintergrundwissen zur Funktionsweise digitaler Technologien (2.2.), Wissen über technologische Anwendungen in fachlichen Hintergrunddisziplinen (3.1.) sowie medienerzieherisches bzw. medienbildnerisches Wissen (4.2.).

Die Analysen in diesem Abschnitt zeigen, dass zwischen den drei Kennzahlen - absolute Codehäufigkeiten, Mittelwerte pro Kategorie und Anteil der Personen mit mindestens einem Code pro Kategorie – keine wesentlichen Abweichungen bestehen. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Analysen ausschließlich die Codehäufigkeiten betrachtet.

4.3 Unterschiede der Schwerpunktsetzung nach Fachbeurteilung

Die Beurteilungen der AR-Applikationen in den Fächern Mathematik, Biologie und Physik unterscheiden sich deutlich in der Häufigkeit der Codes innerhalb der TPACK-Wissensbereiche (siehe Abb. 4). Kruskal-Wallis-Tests zeigen, dass sich in allen Wissensbereichen mindestens zwei Fachbeurteilungsgruppen signifikant in ihrer Codehäufigkeit unterscheiden (siehe Appendix 3). Da ein Teil der (angehenden) Lehrpersonen mehrfach an der Studie teilnahm ($n = 45$ zweimal, $n = 11$ dreimal), werden ergänzend im Appendix 4 die Ergebnisse der Wilcoxon-Tests für paarweise Vergleiche berichtet. Neun der 16 signifikanten Unterschiede in den Kruskal-Wallis-Tests zeigen sich ebenfalls in den Wilcoxon-Tests. Die verbleibenden Unterschiede weisen – mit einer Ausnahme (Unterschied von TCK zwischen Mathematik und Biologie, im Wilcoxon-Test knapp nicht signifikant, $p > .05$) – nach Cohen (1988) kleine Effektstärken auf ($r = .1$ bis $.3$). Abgesehen von einem signifikanten Unterschied der TK-Codehäufigkeiten zwischen Biologie und Physik stimmen die Ergebnisse der Wilcoxon-Tests mit den Kruskal-Wallis-Befunden überein. Im Folgenden werden ausschließlich jene Fachbeurteilungsunterschiede berichtet, die in beiden Tests signifikant ausfielen (siehe Unterstreichungen in Appendix 3 und 4).

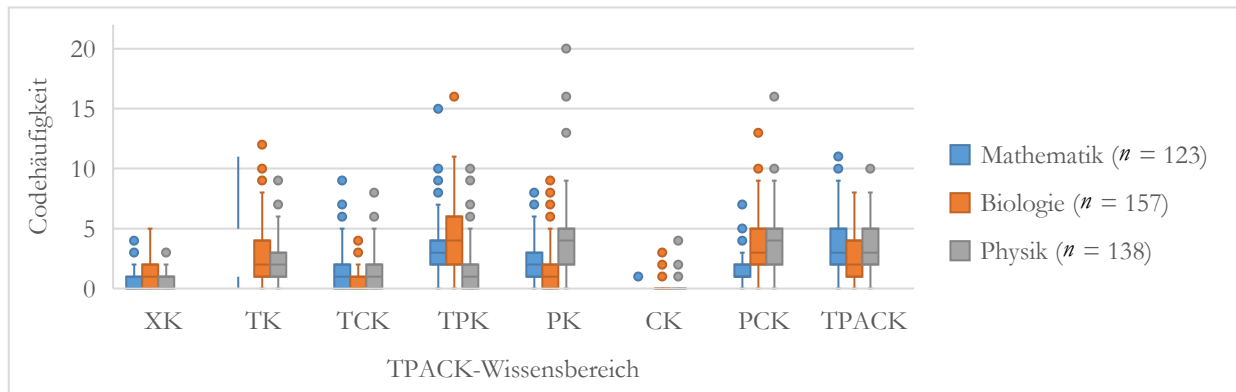


Abb. 4. Boxplot Codehäufigkeiten TPACK-Wissensbereiche nach Fachbeurteilung

In jeder Fachbeurteilung tritt ein Wissensbereich signifikant seltener auf als in den beiden anderen Fachbeurteilungen: Im Fall der Mathematik-Applikationen ist dies das fachdidaktische Wissen (PCK), bei den Physik-Applikationen das technologiebezogene pädagogische Wissen (TPK) und bei den Biologie-Applikationen das pädagogische Wissen (PK). Zusätzlich zeigt sich, dass das technologiebezogene fachliche Wissen (TCK) in der Beurteilung der Biologie-Applikationen signifikant seltener vorkommt als bei den Physik-Applikationen, und das technologiebezogene fachdidaktische Wissen (TPACK) bei den Biologie-Applikationen signifikant seltener genannt wird als bei den Mathematik-Applikationen. Das pädagogische Wissen (PK) tritt bei den Physik-Applikationen signifikant häufiger auf als bei den Mathematik- und Biologie-Applikationen. Keine signifikanten Unterschiede, die sowohl durch Kruskal-Wallis- als auch durch Wilcoxon-Tests gestützt werden, wurden in den Wissensbereichen Kontextwissen (XK), technologisches Wissen (TK) und fachliches Inhaltswissen (CK) festgestellt.

Auch auf Ebene der Subkategorien zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Fachbeurteilungen, wie Kruskal-Wallis- und Wilcoxon-Tests belegen. Aufgrund der Vielzahl an Subkategorien werden im Folgenden nur die Subkategorien der TPACK-Wissensbereiche betrachtet, die sich signifikant zwischen den Fachbeurteilungen unterscheiden. Tabelle

Tab. 7 listet innerhalb dieser ausgewählten Wissensbereiche diejenigen Subkategorien auf, die sich in den Kruskal-Wallis-Tests signifikant zwischen den Fachbeurteilungen unterscheiden. Subkategorien, die zusätzlich auch in den Wilcoxon-Tests signifikant ausfallen (siehe Appendix 5), sind in der Tabelle unterstrichen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Subkategorien entsprechend der Stärke der Effektgrößen farblich hervorgehoben.

Tab. 7. Fachbeurteilungsvergleich der Codehäufigkeiten der Subkategorien (Kruskal-Wallis-Tests, Post-hoc: Dunn-Tests mit Bonferroni-Korrektur)

TPACK-Wissensbereich	Mathematik ($n = 123$) – Physik ($n = 138$)	Mathematik ($n = 123$) - Biologie ($n = 157$)	Biologie ($n = 157$) - Physik ($n = 138$)
TCK			3.2. Wissen über Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen ($\chi = -6.329, p < .001, r = -.369$)
TPK	4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen ($\chi = 6.251, p < .001, r = .387$)		4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen ($\chi = 9.288, p < .001, r = .541$)
PK	5.1. Wissen über Lernprozesse von Lernenden ($\chi = -2.565, p = .031, r = -.159$) 5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen ($\chi = -4.080, p < .001, r = -.253$)	5.1. Wissen über Lernprozesse von Lernenden ($\chi = -4.671, p < .001, r = -.279$) 5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen ($\chi = 5.806, p < .001, r = .347$)	5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen ($\chi = -10.327, p < .001, r = -.601$)
PCK	Signifikanter Unterschied bei allen Subkategorien außer: 7.2.3. Schüler*innenvorstellungen 7.2.4. Diagnose von Schüler*innenwissen 7.3.1.2. Modellverständnis 7.3.2.1. Repräsentationsformen Diese Subkategorien unterscheiden sich auch bei den Wilcoxon-Tests: 7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten ($\chi = -12.563, p < .001, r = -.778$) ^a 7.3.1. Modellkompetenz ($\chi = -8.525, p < .001, r = -.528$) ^a 7.3.1.1. Modellwissen und -arbeit ($\chi = -8.489, p < .001, r = -.526$) 7.3.4. Realitätsbezug ($\chi = -6.482, p < .001, r = -.401$) 7.3.5. Unterrichtsplanung und -begleitung ($\chi = -9.422, p < .001, r = -.583$)	7.1.2. Nötiges Vorwissen ($\chi = -4.296, p < .001, r = -.257$) 7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten ($\chi = -8.890, p < .001, r = -.531$) ^a 7.3.2. Visualisierung ($\chi = -6.228, p < .001, r = -.372$) ^a 7.3.2.3. Allgemeine Visualisierungshinweise ($\chi = -6.376, p < .001, r = -.381$) 7.3.3. Erklärungen ($\chi = -8.458, p < .001, r = -.506$) 7.3.4. Realitätsbezug ($\chi = -3.373, p = .002, r = -.202$)	
TPACK		8.1. Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium ($\chi = 2.745, p = .018, r = .164$) 8.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen in Verbindung mit dem Medium ($\chi = 6.184, p < .001, r = .370$)	

^a aus mehreren Subkategorien aggregierte WerteEffektstärke nach Cohen (1988): klein ($r = .1$ bis $.3$), **mittel** ($r = .3$ bis $.5$), **stark** ($r = .5$ und höher)Unterschied auch bei Wilcoxon-Tests (siehe Appendix 5)

In Bezug auf die Forschungsfrage zeigt sich, dass bestimmte TPACK-Wissensbereiche und die damit verbundenen Themen von (angehenden) Lehrpersonen fächerübergreifend in ähnlicher Weise berücksichtigt werden, während andere stärker fachbeurteilungsspezifisch ausgeprägt sind. So lag der Schwerpunkt bei den Mathematik-Applikationen vergleichsweise weniger auf dem fachdidaktischen Wissen (PCK), bei den Physik-Applikationen weniger auf dem technologiebezogenen pädagogischen Wissen (TPK) und bei den Biologie-Applikationen weniger auf dem pädagogischen Wissen (PK). Darüber hinaus wurde bei den Biologie-Applikationen das technologiebezogene fachliche Wissen (TCK)

seltener thematisiert als bei den Physik-Applikationen und das technologiebezogene fachdidaktische Wissen (TPACK) seltener als bei den Mathematik-Applikationen. Im Gegensatz dazu wurde pädagogisches Wissen (PK) bei der Beurteilung der Physik-Applikationen deutlich stärker berücksichtigt als bei den Mathematik- und Biologie-Applikationen. Weniger spezifisch für eine bestimmte Fachbeurteilung waren hingegen die Wissensbereiche technologisches Wissen (TK), fachliches Inhaltswissen (CK) und Kontextwissen (XK), da sie über alle Fachbeurteilungen hinweg in ähnlicher Häufigkeit angesprochen wurden.

Auch innerhalb der einzelnen TPACK-Wissensbereiche zeigen sich fachbeurteilungsspezifische Unterschiede in den thematischen Schwerpunkten der (angehenden) Lehrpersonen. So spielt mediendidaktisches/medienspsychologisches Wissen (4.1.) bei der Beurteilung der Physik-Applikationen eine geringere Rolle als bei den Mathematik- und Biologie-Applikationen. Stattdessen wird im Physikbereich verstärkt die Gestaltung von Lernumgebungen (5.7.) thematisiert. Ebenso rückt in der Physik das Wissen über die Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen (3.2.) stärker in den Vordergrund als bei den Biologie-Applikationen. In den Biologie-Beurteilungen ist hingegen die Gestaltung von Lernumgebungen (5.7.) vergleichsweise am wenigsten präsent. Die Mathematik-Applikationen werden weniger breit fachdidaktisch (PCK) diskutiert. Insbesondere wird bei den mathematischen Applikationen am seltensten über das Verständlichmachen von Inhalten (7.3.) gesprochen. Im Vergleich zu den Physik-Applikationen werden zudem Aspekte wie Modellkompetenz (7.3.1.), Modellwissen und -arbeit (7.3.1.1.), Realitätsbezug (7.3.4.) sowie Unterrichtsplanung und -begleitung (7.3.5.) seltener angesprochen. Im Vergleich zu den Biologie-Applikationen spielen bei der Mathematik-Beurteilung außerdem das nötige Vorwissen (7.1.2.), allgemeine Visualisierungshinweise (7.3.2.3.) und Erklärungen (7.3.3.) eine untergeordnete Rolle. Stattdessen liegt bei den Mathematik-Applikationen ein stärkerer Fokus auf zwei der drei Subkategorien des technologiebezogenen fachdidaktischen Wissens (TPACK) als bei den Biologie-Applikationen: dem Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium (8.1.) sowie dem Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen in Verbindung mit dem Medium (8.2.).

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfrage

5.1.1 Fokus (angehender) Lehrpersonen bei der Beurteilung von Augmented-Reality-Applikationen

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich (angehende) MINT-Lehrpersonen der Sekundarstufe I und II bei der Bewertung und Auswahl von sowie Planung mit AR-Applikationen auf unterschiedliche Wissensbereiche des TPACK-Modells beziehen. Dabei zeigen sich jedoch deutliche Priorisierungen. Die am häufigsten herangezogenen TPACK-Wissensbereiche beinhalten – mit Ausnahme des technologischen Wissens (TK) – stets pädagogisches Wissen (PK). Dies legt nahe, dass AR-Applikationen vorrangig aus einer pädagogischen Perspektive betrachtet werden, was sich mit der pädagogischen Ausrichtung der Lehrpersonenbildung erklären lässt. Gleichzeitig überrascht es nicht, dass technologische Aspekte eine zentrale Rolle einnehmen. Studien weisen darauf hin, dass die Benutzerfreundlichkeit digitaler Medien ein entscheidender Faktor für deren Akzeptanz ist (Dunleavy et al., 2008; Bürg & Mandl, 2005). Zudem hatte mehr als die Hälfte der befragten (angehenden) Lehrpersonen (52.9 %) bislang keine praktische Erfahrung mit AR-Applikationen und 93.8 % setzten sie noch nie im Unterricht ein. Diese Befunde stimmen mit bisherigen Forschungsergebnissen zu begrenzten praktischen Erfahrungen (angehender) Lehrpersonen mit AR-Technologien überein (siehe Abschnitte 2.3 und 2.4). Der Mangel an Erfahrung könnte zu einer verstärkten Fokussierung auf technologische Aspekte geführt haben. Beim technologiebezogenen fachdidaktischen Wissen (TPACK), der Verbindung von pädagogischem, technologischem und fachlichen Wissen, handelt es sich zwar bereits jetzt um den durch (angehende) Lehrpersonen am häufigsten angesprochenen Wissensbereich. Gleichzeitig besteht hier Potenzial zur Weiterentwicklung: Viele mediendidaktische Aussagen bleiben allgemein und müssten fachdidaktisch fundiert werden. So ließe sich beispielsweise die unter TPK codierte Aussage zur Applikation AR Stromkreismodelle - „Ich würde die SuS über Stromkreise kurz über die Handhabung der App orientieren und gleich damit starten. Die unterschiedlichen Animationen sollen dabei beschrieben werden. Nach diesen Auswertungen würde ich mit dem theoretischen Hintergrund beginnen und immer wieder auf die App verweisen.“ (428; Pos. 20) - mit fachdidaktischen Konzepten wie Modellwissen und -arbeit (PCK) verknüpfen, um TPACK zu erreichen.

Über alle Fachbeurteilungen hinweg wurde am seltensten auf das fachliche Inhaltswissen (CK) Bezug genommen. Da deutlich mehr (angehende) Sek I-Lehrpersonen als Sek II-Lehrpersonen befragt wurden (siehe Tab. 3), ist eine mögliche Erklärung hierfür die Ausrichtung der Lehrpersonenbildung in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.3). Sek I-Lehrpersonen besuchen eine Pädagogische Hochschule und erwerben dort vorrangig fachdidaktisches Wissen (PCK) (Larcher Klee & Schmidiger, 2021), während Sek II-Lehrpersonen über einen fachwissenschaftlichen Master verfügen und sich zusätzlich für das Lehrdiplom der Maturitätsschulen qualifizieren, wodurch ihr Bezug zum fachlichen Inhaltswissen (CK) stärker ausgeprägt ist. Hinzu kommt, dass es sich bei den zu beurteilenden Objekten – den AR-Applikationen – um ein spezifisches Lernmaterial handelt, das unmittelbar mit pädagogischen Aspekten verknüpft ist. Dieser pädagogische Fokus könnte auch erklären, warum das technologiebezogene fachliche Wissen (TCK) nur selten beigezogen wurde, da es sich ebenfalls um eine Wissenskategorie ohne direkten pädagogischen Bezug handelt. Insgesamt machen Wissensbereiche mit Fachbezug (TCK, CK, PCK und TPACK) weniger als die Hälfte der Codierungen aus (3161 von 7126 Codes). Angesichts der thematischen Ausrichtung auf MINT-spezifische AR-Applikationen könnte ein höherer Anteil an fachbezogenen Wissensbereichen erwartet werden. Auch Kontextwissen (XK) wurde nur selten beigezogen.

Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmenden gebeten wurden, die Applikationen primär unter idealen Bedingungen zu beurteilen; lediglich die letzten beiden Fragen bezogen sich explizit auf reale schulische Rahmenbedingungen (siehe Abschnitt 3.2). Zudem befand sich ein Großteil der Teilnehmenden ($n = 311$ von $N = 418$) noch im Studium, was eine realitätsnahe Einschätzung schulischer Kontexte zusätzlich erschwerte. Je nach Studienfortschritt verfügten viele noch über geringe berufspraktische Erfahrung. Mehrere Studierende wiesen explizit darauf hin, dass ihnen schulische Gegebenheiten nicht oder nur begrenzt bekannt seien – etwa in der folgenden Aussage: „Die Planung wäre dieselbe. Das Einzige, das ich beachten müsste, wäre, ob mein Arbeitgeber die Kosten für die App übernimmt oder Geräte zur Benutzung der App bereitstellen kann.“ (40; Pos. 33). Hindernisse erster Ordnung im Sinne von Ertmer (1999) – also externe Barrieren der Technologieintegration, etwa hinsichtlich technischer Ausstattung (siehe Abschnitt 2.3) – konnten von Studierenden daher nur eingeschränkt eingeschätzt werden.

Bei der Betrachtung der Unterthemen der TPACK-Wissensbereiche zeigt sich, dass (angehende) Lehrpersonen bestimmte Aspekte deutlich stärker fokussieren als andere. Auffällig ist insbesondere, dass Schüler*innenkognitionen und die Diagnose von Schüler*innenwissen kaum thematisiert werden – weder auf fachdidaktischer noch auf technologiebezogener fachdidaktischer Ebene. Dies betrifft Aspekte wie Interessen, typische Schwierigkeiten und Fehler der Schüler*innen, Schüler*innenvorstellungen sowie die Diagnose von Schüler*innenwissen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Befunden von Ga et al. (2024) und Tan et al. (2023), die ebenfalls zeigen, dass die individuellen Voraussetzungen der Lernenden bei der Planung mit Augmented Reality häufig vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 2.4). Demgegenüber betont die fachdidaktische Literatur die zentrale Bedeutung der Berücksichtigung von Schüler*innenkognitionen für einen erfolgreichen Unterricht (Baumert et al., 2004; Baumert & Kunter, 2006; Krauss et al., 2008; Baumert & Kunter, 2011; Kunter et al., 2011). So sollten etwa bei der Planung von Unterrichtseinheiten zu elektrischen Stromkreisen bestehende Schüler*innenvorstellungen explizit berücksichtigt werden (siehe z. B. Wilhelm & Hopf, 2018).

Weitere aus fachdidaktischer Perspektive zentrale Themen wie nötiges Vorwissen (Reinfried & Tempelmann, 2014), Modellverständnis (Meisert, 2008; Upmeyer zu Belzen & Krüger, 2010) sowie der Umgang mit Repräsentationsformen und multiplen Repräsentationen (Bruner, 1974; Ainsworth, 1999) werden ebenfalls nur selten aufgegriffen. Die in den analysierten AR-Applikationen behandelten Themen – Raumgeometrie, Blutgruppen/Herz und elektrische Stromkreise – und die entsprechenden Umsetzungen in den Applikationen würden jedoch vielfältige Anlässe bieten, diese fachdidaktisch bedeutsamen Aspekte gezielt zu adressieren. Beispielsweise setzen die Biologie-Applikationen ein gewisses Vorwissen zu den Blutgruppen und zum Herzen voraus, da sie kein Grundlagenwissen vermitteln. Um die Physik-Applikation AR Stromkreismodelle lernwirksam einsetzen zu können, wäre ein grundlegendes Verständnis über die Rolle und das Wesen von Modellen erforderlich. Und da in allen Applikationen der Lerngegenstand in unterschiedlichen Formen dargestellt wird, z. B. in der Mathematik-Applikation Sólidos RA das Entfalten von Netzen, wären auch Hinweise zur Umsetzung der Repräsentationsformen und multiplen Repräsentationen in den Applikationen angebracht. Der fehlende Fokus auf Schüler*innenkognitionen und weitere fachdidaktisch relevante Bereiche deutet deshalb auf einen Bedarf an fachdidaktischer Aus- und Weiterbildung in diesen Bereichen hin. Technologien im Allgemeinen und Augmented Reality im Besonderen bieten großes Potenzial, fachliche Lernprozesse individuell zu fördern und komplexe Inhalte visuell zugänglich zu machen (Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Sirakaya & Sirakaya, 2020; Arici et al., 2021). Eine Schulung des fachdidaktischen Wissens zu den genannten Themen sollte daher gezielt auch den Einsatz digitaler Technologien – wie Augmented Reality – zur Unterstützung fachlichen Lernens einbeziehen, um die Entwicklung integrativer TPACK-Kompetenzen zu fördern.

Auch im Bereich des fachlichen Inhaltswissens (CK) könnte Schulungsbedarf bestehen, da dieser Wissensbereich von den (angehenden) Lehrpersonen nur selten thematisiert wird – obwohl er für die fundierte Beurteilung von Lernaufgaben entscheidend wäre. So zeigen Studien eine enge Korrelation zwischen fachlichem Inhaltswissen (CK) und fachdidaktischem Wissen (PCK) (Blömeke et al., 2008; Krauss et al., 2008) sowie einen direkten Einfluss des fachlichen Inhaltswissens (CK) der Lehrperson auf den Lernerfolg der Schüler*innen (Lipowsky, 2006). Der geringe Fokus auf fachliches Inhaltswissen (CK) könnte aber auch darauf zurückzuführen sein, dass es sich bei den zu beurteilenden Objekten – den AR-Applikationen – um spezifisches Lernmaterial handelt, das unmittelbar mit pädagogischen Aspekten verknüpft ist. Dies könnte dazu geführt haben, dass (angehende) Lehrpersonen fachliches Inhaltswissen (CK) nicht explizit benannt oder verschriftlicht haben. Hinzu kommt, dass in den Applikationen kaum fachliche Fehler zu finden waren, was die Notwendigkeit einer inhaltlichen Auseinandersetzung aus Sicht der Teilnehmenden zusätzlich reduziert haben könnte. Im Bereich des pädagogischen Wissens (PK) konzentrieren sich die (angehenden) Lehrpersonen überwiegend auf Lehr-Lernmethoden und -konzepte sowie die Gestaltung von Lernumgebungen. Andere wichtige pädagogische Themen wie Lernprozesse, Heterogenität, Lehr- und Lernziele, Führung, Kommunikation und Interaktion sowie Individual- und Lernprozessdiagnostik werden dagegen nur selten thematisiert. Dies lässt sich zum einen durch die spezifische Aufgabe der Beurteilung von AR-Applikationen erklären, weist jedoch auch auf einen möglichen Schulungsbedarf in diesen Bereichen hin.

(Angehende) Lehrpersonen beziehen sich bei der Bewertung und Auswahl von sowie Planung mit AR-Applikationen wenig auf übergreifende Kategorien auf der Metaebene, sondern äußern sich primär zu den getesteten Applikationen. Der geringe Bezug zu übergreifenden Kategorien lässt sich durch die spezifische Fragestellung der Umfrage zur Bewertung von AR-Applikationen erklären. Dies könnte dazu geführt haben, dass Aspekte der Metaebene zwar reflektiert, aber nicht explizit niedergeschrieben wurden. Dennoch soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, wie wichtig es ist, dass (angehende) Lehrpersonen das Zusammenspiel von Technologie, Pädagogik und Fachinhalten auch auf einer Metaebene reflektieren. Damit beispielsweise authentische Kontexte mit physikalisch-technischem Bezug – wie

sie Schmid (2023) zufolge positive Effekte auf affektive Merkmale von Lehramtsstudierenden und Schüler*innen haben können – überhaupt einbezogen werden können, ist ein fundiertes Wissen über Technologien in den entsprechenden Hintergrunddisziplinen erforderlich. Im Bereich des technologiebezogenen pädagogischen Wissens (TPK) betont die Forschungsliteratur, dass beim Medieneinsatz nicht nur didaktische und psychologische Aspekte, sondern auch medienerzieherische und medienbildnerische Perspektiven berücksichtigt werden sollten. Technologien sollten nicht lediglich als Werkzeuge betrachtet werden, sondern als integraler Bestandteil eines komplexen pädagogischen Prozesses (siehe z. B. Döbeli Honegger & Merz, 2015). Dafür sind fundierte Kenntnisse der Rahmenbedingungen des Technologieeinsatzes in der Schule, in der Bildungspolitik und der Gesellschaft erforderlich, insbesondere in Bezug auf den Einfluss von Technologien auf unseren Alltag. In diesem Zusammenhang erweitert das DPaCK-Modell das TPACK-Modell um eine systematische Berücksichtigung sozialer und kultureller Dimensionen der digitalen Transformation (siehe Abschnitt 2.1). (Angehende) Lehrpersonen hingegen fokussieren sich im Bereich TPK nahezu ausschließlich auf mediendidaktische und medienpsychologische Aspekte. Auch auf der technologischen Ebene liegt der Schwerpunkt überwiegend auf Anwendungswissen, insbesondere der Benutzerfreundlichkeit der Applikationen. Konzeptionelles Hintergrundwissen, das für eine fundierte Bewertung neuer Technologien wichtig wäre (siehe z. B. National Academy of Engineering and National Research Council, 2006), wird kaum thematisiert. Da über die Hälfte der Befragten (52.9 %) noch nie eine AR-Applikation getestet hatten, ist dieses begrenzte Wissen nachvollziehbar – es verdeutlicht jedoch Schulungsbedarf im technologischen und technologiebezogenen pädagogischen Wissen (TK und TPK). Auch die Studien von Belda-Medina & Calvo-Ferrer (2022) sowie Freese et al. (2023) weisen auf diesen Weiterbildungsbedarf im Bereich von TPK hin, wobei der Fokus dort insbesondere auf dem didaktischen Einsatz und somit auf mediendidaktischem Wissen lag (siehe Abschnitt 2.4).

5.1.2 Unterschiede der Schwerpunktsetzung nach Fachbeurteilung

Die signifikanten Unterschiede in den Codehäufigkeiten zwischen den Fachbeurteilungen und somit zwischen den AR-Applikationen deuten darauf hin, dass (angehende) Lehrpersonen ihre Bewertungen stark applikations- und fächerspezifisch vornehmen. Am wenigsten unterscheiden sich die Fachbeurteilungen in Bezug auf die Häufigkeit der Bezugnahmen auf Kontextwissen (XK), technologisches Wissen (TK) und fachliches Inhaltswissen (CK). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die allgemeinen Rahmenbedingungen des Unterrichts unabhängig vom Fach und von der verwendeten Applikation weitgehend konstant sind. Aspekte wie Benutzerfreundlichkeit und fachliche Korrektheit sind für alle Anwendungen gleichermaßen relevant, was die fehlenden Unterschiede in diesen Bereichen nachvollziehbar macht.

Auffällig ist, dass (angehende) Lehrpersonen die Mathematik-Applikationen signifikant seltener unter fachdidaktischen Gesichtspunkten beurteilen als die Applikationen der anderen Fächer, insbesondere im Hinblick auf das Verständlichmachen von Inhalten. Im Vergleich zu den Physik-Applikationen werden zudem die Subkategorien Modellkompetenz (Modellwissen und -arbeit), Realitätsbezug sowie Unterrichtsplanung und -begleitung in den Bewertungen seltener thematisiert. Dies lässt sich darauf zurückzuführen, dass eine der Physik-Applikationen Stromkreismodelle thematisiert (siehe Appendix 1), wodurch der Fokus bei der Physikbeurteilung verstärkt auf modellbezogene Aspekte gelenkt wird. Die zweite Physik-Applikation ist eine Stromkreissimulation, weshalb der (fehlende) Realitätsbezug bei der Physik-Applikationen häufig diskutiert wird. Im Vergleich zu den Biologie-Applikationen werden in der Bewertung der Mathematik-Applikationen seltener Aspekte wie nötiges Vorwissen, allgemeine Visualisierungshinweise und die Qualität von Erklärungen thematisiert. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der inhaltlichen und visuellen Komplexität der Biologie-Applikationen: Diese erfordern spezifisches Vorwissen zu den Themen Blutgruppen und Herz, betonen die dreidimensionale Darstellung biologischer Prozesse und enthalten erklärende Komponenten, deren Qualität entsprechend kritisch reflektiert wird. Es kann vermutet werden, dass bei den Mathematik-Applikationen die fachdidaktische Diskussion bereits stärker mit der Technologie verknüpft ist, da (angehende) Lehrpersonen im Bereich Raumgeometrie möglicherweise stärker an den Einsatz digitaler Visualisierungen gewöhnt sind – etwa durch dynamische Geometriesoftware wie GeoGebra – als dies in der Biologie und Physik der Fall ist. Dies könnte dazu geführt haben, dass die AR-Applikationen häufig direkt mit bereits etablierten digitalen Visualisierungswerkzeugen verglichen werden. Ein Beispiel dafür ist die folgende Einschätzung: „Sind die SuS an GeoGebra gewöhnt, dann ist die Handhabung dort sicher einfacher, man benötigt auch nicht diese vielen QR-Codes. Zudem kann man dort besser Strecken oder Punkte/Parallelen/Senkrechten/Winkel/Transformationen etc. eintragen. Für das Gymnasium sind das alles unverzichtbare Größen.“ (467, Pos. 8). Wenn die getesteten AR-Applikationen in der Mathematik weniger überzeugend wirken als die etablierten digitalen Werkzeuge, könnte dies zu einer weniger detaillierten fachdidaktischen Auseinandersetzung führen. Diese Interpretation wird durch die höhere Häufigkeit von Bezugnahmen auf TPACK in der Mathematik im Vergleich zur Biologie gestützt, insbesondere bei den Themen Potenzial von Aufgaben mit dem Medium sowie Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen im Zusammenhang mit dem Medium. Im Vergleich zur Physik zeigt sich in der Mathematik jedoch kein stärkerer Fokus auf TPACK. Eine weitere mögliche Erklärung für die geringere Häufigkeit von Bezugnahmen auf PCK in der Mathematikbeurteilung könnte darin liegen, dass für die Raumgeometrie in der Lehrpersonenbildung weniger explizite fachdidaktische Seminare oder praxisorientierte Beispiele angeboten werden, da in der schulischen Praxis die ebene Geometrie stärker im Vordergrund steht (Elschenbroich & Strässer, 2022). Im Vergleich zu Themen wie Stromkreis und Blutgruppen/Herz, die in der Lehrpersonenbildung häufig sehr praxisorientiert behandelt werden, könnte die Raumgeometrie weniger präsent sein, was zu einer reduzierten fachdidaktischen Auseinandersetzung führen könnte.

Die geringere Häufigkeit von Bezugnahmen auf das technologiebezogene pädagogische Wissen (TPK) bei der Physikbeurteilung könnte auf eine höhere Benutzerfreundlichkeit der Physik-Applikationen zurückzuführen sein, wodurch potenzielle Herausforderungen im Unterricht minimiert werden und somit weniger Bemerkungen zu diesem Bereich erforderlich sind („Kurze Erklärung zu Beginn und es läuft, die Schülerinnen und Schüler können damit arbeiten.“ (507, Pos. 15)). In der Biologie könnte die geringere Häufigkeit von Bezugnahmen auf das pädagogische Wissen (PK) und die damit verbundene Diskussion über die Gestaltung von Lernumgebungen darauf zurückzuführen sein, dass für diese Applikationen im Vergleich zu den anderen Fächern weniger Materialorganisation notwendig ist. In der Physik hingegen könnte die Notwendigkeit einer intensiveren Materialorganisation ein Schwerpunkt gewesen sein, da für eine der Applikationen elektrische Bauteile benötigt werden (siehe Appendix 1; „Das App benötigt einen hohen Materialaufwand (Elektrobaukasten, Trafo, Tablet mit vorinstallierter Software.“ (626, Pos. 11)). Die geringere Häufigkeit von Bezugnahmen auf das technologiebezogene fachliche Wissen (TCK) in der Biologiebeurteilung im Vergleich zur Physikbeurteilung könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Biologie-Applikationen im Vergleich zu den Physik-Applikationen eher eine inhaltsvermittelnde Funktion als eine Werkzeugsfunktion haben, wodurch Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen eine kleinere Rolle spielen könnten.

5.1.3 Fazit

(Angehende) Lehrpersonen fokussieren sich bei der Bewertung und Auswahl von sowie Unterrichtsplanung mit AR-Applikationen auf unterschiedliche TPACK-Wissensbereiche und damit verbundene Themen, während andere Aspekte weniger berücksichtigt werden. Das technologiebezogene fachdidaktische Wissen (TPACK) sollte durch gezielte Schulungen gefördert werden. Besonders im Fokus sollten dabei Schüler*innenkognitionen und die Diagnose von Schüler*innenwissen in Kombination mit Technologien stehen. Zudem sollten Lehrpersonen in die Lage versetzt werden, auf einer Metaebene über die Wechselwirkungen von Technologie, Pädagogik und Fachinhalten nachzudenken, beispielsweise im Hinblick auf medienerzieherische und medienbildnerische Aspekte.

(Angehende) Lehrpersonen beurteilen AR-Applikationen stark applikations- und fächerspezifisch. Der geringere Fokus auf Fachdidaktik bei der Mathematikbeurteilung könnte auf Schulungsbedarf hinweisen, aber auch durch das Thema Raumgeometrie oder die Verfügbarkeit alternativer digitaler Visualisierungstools erklärbar sein. Die Fachbeurteilungsunterschiede zeigen, dass (angehende) Lehrpersonen sowohl positive als auch negative Aspekte der Applikationen, wie etwa die hohe Benutzerfreundlichkeit der Physik-Applikationen, berücksichtigen.

Für einen effektiven Einsatz von AR-Applikationen in MINT-Fächern sind spezifische Ausbildungsangebote erforderlich, die über technische Aspekte hinaus gehen (Stinken-Rösner et al., 2023; Wilson et al., 2020; Zimmermann et al., 2021; Freese et al., 2023). Die Bedeutung einer sorgfältigen Unterrichtsplanung darf dabei nicht unterschätzt werden: Die Ergebnisse von Ga et al. (2024) zeigen, dass eine mangelhafte Berücksichtigung relevanter TPACK-Elemente in der Planung zu Problemen im Unterricht führen kann. Verschiedene Ansätze zur Förderung von AR-Kompetenzen wurden bereits entwickelt. Best-Practice-Beispiele sind hierbei besonders wichtig, da nur wenige (angehende) Lehrpersonen über Erfahrungen mit Augmented Reality und deren Anwendung im Unterricht verfügen (siehe Abschnitte 2.3 und 2.4). Im Learning-Technology-by-Design-Ansatz gestalten und nutzen (angehende) Lehrpersonen aktiv AR-basierte Lernumgebungen für authentische pädagogische Fragestellungen, was das Kompetenzerleben steigern kann (Buchner & Zumbach, 2020a, 2020b). Forschungsergebnisse von Ke & Hsu (2015) zeigen, dass die eigene Gestaltung von AR-Applikationen sowohl TPK als auch TPACK fördert, während die Betrachtung bestehender AR-Anwendungen das fachliche Inhaltswissen (CK) der Lehrpersonen stärkt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Entwicklung von AR-Applikationen die Perspektive der Lehrperson und bei der Betrachtung die der Lernenden eingenommen wird.

5.2 Limitationen und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Kategoriensystem vorgestellt, das die Einschätzungen von (angehenden) Lehrpersonen zu AR-Applikationen mit MINT-Themen systematisch den TPACK-Wissensbereichen zuordnet. Dabei wurde untersucht, welche Wissensbereiche besonders häufig bzw. selten berücksichtigt wurden, und wie sich diese Verteilungen zwischen den Applikationen, bzw. Fächern, unterscheiden, um mögliche Schulungsbedarfe zu identifizieren. Aufbauend darauf sollen in künftigen Analysen Unterschiede zwischen angehenden Lehrpersonen in verschiedenen Studienphasen sowie ausgebildeten Lehrpersonen systematisch untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass die Teilnehmenden aus unterschiedlichen Standorten mit variierenden curricularen Schwerpunkten stammen und die ausgebildeten Lehrpersonen überwiegend freiwillig an den Weiterbildungen teilnahmen.

Die Ergebnisse der Studie sind aufgrund des kontextspezifischen Aufbaus auf AR-Applikationen beschränkt. Die Wahl von AR als Technologie, die im Bildungsbereich noch nicht etabliert ist, ermöglicht es, zu untersuchen, wie (angehende) Lehrpersonen ihr fachdidaktisches Wissen in neuen, bislang unbekannten Kontexten anwenden. Bei bereits vertrauten digitalen Medien, wie etwa Erklärvideos, könnten die Befunde hingegen abweichen. Zukünftige Studien könnten diese Unterschiede gezielt untersuchen, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse besser beurteilen zu können.

Die Intercoder-Übereinstimmung wies verbesserungswürdige Werte auf. Die Codierung gestaltete sich aufgrund der nicht trennscharfen TPACK-Wissensbereiche (siehe z. B. Archambault & Barnett, 2010; Graham, 2011), der Vielzahl an Kategorien und der Form der Daten als schwierig. Da die Teilnehmenden ihre Antworten innerhalb einer vorgegebenen Zeit schriftlich verfassten, fehlten oft Kontextinformationen im Vergleich zu Interviews, was die Interpretation

und Codierung erschwerte. Zukünftige Studien könnten daher ein Interviewformat in Betracht ziehen, um bei Unklarheiten nachfragen zu können.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse konzentrieren sich auf den Fokus von (angehenden) Lehrpersonen, der durch die Codehäufigkeiten in den einzelnen Kategorien und somit durch quantitative Daten erhoben wurde. Dabei wurden die Qualität und Korrektheit der Einschätzungen der (angehenden) Lehrpersonen noch nicht berücksichtigt, was weitere qualitative Analysen erforderlich macht. Beispielsweise zeigen sich beim fachdidaktischen Wissen (PCK) große Unterschiede in der Qualität der Aussagen und ihrer wissensbasierten Begründung. Die Antworten reichen von qualitativ hochwertigen fachdidaktischen Einschätzungen bis hin zu problematischen Präkonzepten: „Auch finde ich super, dass erkennbar (wenn nicht sogar erlebbar) wird, dass es bei der Spende um die roten Blutkörperchen (und somit nicht um die Antikörper) geht. Häufig ist hier nämlich eine Fehlvorstellung bei den Lernenden vorhanden, die durch den in der App dargestellten Prozess behoben werden können.“ (287; Pos. 9) bzw. „Es wird ersichtlich, dass der Verbraucher die Spannung verbraucht - die elektronische Energie ist das große Bedürfnis der Elektronen, bei der Spannungsquelle einen Ladungsausgleich zu schaffen.“ (344, Pos. 26). Auch im Bereich von TPACK gibt es große Unterschiede: Während einige (angehende) Lehrpersonen keine qualitativ hochwertigen Unterrichtspläne mit AR-Applikationen formulieren, entwickeln andere bereits gut strukturierte, mehrphasige Unterrichtsentwürfe. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Motivation der Teilnehmenden, ihre sprachliche Ausdrucksfähigkeit sowie die begrenzten zeitlichen Ressourcen während der Planung die Ausführlichkeit und Qualität der Unterrichtsplanungen beeinflusst haben könnten. Nachdem im Rahmen dieses Artikels ein Überblick geschaffen wurde, kann der Fokus in weiteren Publikationen auf die Qualität einzelner Aussagen sowie auf Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen – etwa im Hinblick auf Ausbildungsstand oder Zielstufe – gerichtet werden.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde vom Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Digitale Transformation (NFP 77) unterstützt. Dank gilt außerdem den Pädagogischen Hochschulen und Schulen für die Ermöglichung der Datenerhebung, den studentischen Hilfskräften für die Unterstützung bei der Datenerhebung und -auswertung sowie allen Studierenden und Lehrpersonen, die an der Studie teilgenommen haben.

Referenzen

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education* 33(2-3), 131-152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9)
- Akçayır, M. & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Akyuz, D. (2018). Measuring technological pedagogical content knowledge (TPACK) through performance assessment. *Computers & Education*, 125, 212-225. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.06.012>
- Alalwan, N., Cheng, L., Al-Samarraie, H., Yousef, R., Alzahrani, A. I. & Sarsam, S. M. (2020). Challenges and Prospects of Virtual Reality and Augmented Reality Utilization among Primary School Teachers: A Developing Country Perspective. *Studies in Educational Evaluation*, 66, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100876>
- Al-Ansi, A. M., Jabooob, M., Garad, A. & Al-Ansi, A. (2023). Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education. *Social Sciences & Humanities Open*, 8(1), 100532. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100532>
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J. & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *British Journal Of Educational Technology*, 51(3), 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Amorim, L., L. & de Oliveira Freitas, R. (2023). Contribuições do aplicativo Sólidos RA para o desenvolvimento da visualização geométrica na perspectiva da realidade aumentada. *Revista Eletrônica Debates em Educação Científica e Tecnológica*, 13(1), 3-25.
- Anderson, L. W. & Krathwohl, D. R. (2001). *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing. A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*. New York: Longman.
- ANIMA RES (2022). *Insight Heart* [Mobile App]. Google Play Store. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.animares.heart>
- Archambault, L. (2016). Exploring the use of qualitative methods to examine TPACK. In M.C. Herring, M.J. Koehler & P. Mishra (Hrsg.), *Handbook of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) for Educators* (2. Auflage, S. 65-86). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315771328>
- Archambault, L. M. & Barnett, J. H. (2010). Revisiting technological pedagogical content knowledge: Exploring the TPACK framework. *Computers & Education*, 55(4), 1656–1662. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.07.009>
- Arici, F., Yilmaz, R. M., & Yilmaz, M. (2021). Affordances of augmented reality technology for science education: Views of secondary school students and science teachers. *Human Behavior And Emerging Technologies*, 3(5), 1153–1171. <https://doi.org/10.1002/hbe2.310>
- Atanasova, S., Robin, N. & Brovelli, D. (2023). Genderkompetenz messen: Erfassung der situationsbezogenen Fähigkeiten von Lehrpersonen in Bezug auf genderrelevante Aspekte im Physikunterricht. *Unterrichtswissenschaft*, 51(3), 423–453. <https://doi.org/10.1007/s42010-023-00169-y>
- Avila-Garzon, C., Bacca-Acosta, J., Kinshuk, Duarte, J. & Betancourt, J. (2021). Augmented Reality in Education: An Overview of Twenty-Five Years of Research. *Contemporary Educational Technology*, 13(3). <https://doi.org/10.30935/cedtech/10865>
- Azuma, R. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Baumert, J., Blum, W. & Neubrand, M. (2004). Drawing the lessons from PISA 2000: Long term research implications: Gaining a better understanding of the relationship between system inputs and learning outcomes by assessing instructional and learning processes as mediating factors. In D. Lenzen, J. Baumert, R. Watermann & U. Trautwein (Hrsg.), *PISA und die Konsequenzen für die erziehungswissenschaftliche Forschung*. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Beiheft 3/2024, 143-158.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469-520. <https://doi.org/10.1007/s11618-006-0165-2>
- Baumert, J. & Kunter, M. (2011). Das Kompetenzmodell von COACTIV. In M. Kunter, J. Baumert, W. Blum, U. Klusmann, S. Krauss & M. Neubrand (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften: Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV* (S. 29-53). Münster: Waxmann.
- Becker, S., Messinger-Koppelt, J. & Thyssen, C. (2020). *Digitale Basiskompetenzen - Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*. Hamburg: Joachim Herz Stiftung.
- Belda-Medina, J. & Calvo-Ferrer, J. R. (2022). Integrating augmented reality in language learning: pre-service teachers' digital competence and attitudes through the TPACK framework. *Education And Information Technologies*, 27(9), 12123–12146. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11123-3>
- Billion-Kramer, T., Lohse-Bossenz, H. & Rehm, M. (2020). Vignetten zum Modellverständnis – eine Chance für die Lehrerbildung in den naturwissenschaftlichen Fächern. In M. E. Friesen, J. Benz, T. Billion-Kramer, C. Heuer, H. Lohse-Bossenz, M. Resch & J. Rutsch (Hrsg.), *Vignettenbasiertes Lernen in der Lehrerbildung: Fachdidaktische und pädagogische Perspektiven* (1. Auflage, S. 138–152). Beltz Juventa.
- Blömeke, S., Gustafsson, J.-E. & Shavelson, R. J. (2015). Beyond Dichotomies. *Zeitschrift für Psychologie*, 223(1), 3–13. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000194>
- Blömeke, S., Seeber, S., Lehmann, R., Kaiser, G., Schwarz, B., Felbrich, A. & Müller, C. (2008). Messung des fachbezogenen Wissens angehender Mathematiklehrkräfte. In S. Blömeke, G. Gabriele, R. Lehmann (Hrsg.), *Professionelle*

- Kompetenz angehender Lehrerinnen und Lehrer: Wissen, Überzeugungen und Lerngelegenheiten deutscher Mathematikstudierender und -referendare. Erste Ergebnisse zur Wirksamkeit der Lehrerausbildung (S. 49–88). Münster u. a.: Waxmann.
- Brennan, R. L. & Prediger, D. J. (1981). Coefficient Kappa: Some Uses, Misuses, and Alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41(3), 687–699. <https://doi.org/10.1177/001316448104100307>
- Brovelli, D., Vogler, E. & Schmid, A. M. (2019). Geschlechtersensibler Naturwissenschafts- und Technikunterricht: Eine Vignettenstudie bei angehenden Lehrkräften. In E. Makarova (Hrsg.), *Gendersensible Berufsorientierung und Berufswahl: Beiträge aus Forschung und Praxis* (S. 149–163). hep. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3568808>
- Bruner, J. (1974). *Entwurf einer Unterrichtstheorie*. Berlin-Verlag.
- Buchner, J., Buntins, K. & Kerres, M. (2021). 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>
- Buchner, J. & Zumbach, J. (2020a). Die Förderung von TPACK durch den Learning-Technology-by-Design-Ansatz. In J. Zumbach, G. Maresch, T. Fleischer & A. Stahl (Hrsg.), *Neue Impulse in der Naturwissenschaftsdidaktik* (Vol. 8, S. 271–284). Waxman.
- Buchner, J. & Zumbach, J. (2020b). Augmented Reality in Teacher Education. A Framework to support Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge. *Italian Journal of Educational Technology*, 28(2), 106–120. <https://doi.org/10.17471/2499-4324/1151>
- Bürg, O. & Mandl, H. (2005). Akzeptanz von E-Learning in Unternehmen. *Zeitschrift für Personalpsychologie*, 4(2), 75–85. <https://doi.org/10.1026/1617-6391.4.2.75>
- Chai, C. S., Koh, J. H. L. & Tsai, C. C. (2016). A Review of the Quantitative Measures of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK). In M.C. Herring, M.J. Koehler & P. Mishra (Hrsg.), *Handbook of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) for Educators* (2. Auflage, S. 87–106). New York: Routledge.
- Chen, M., Chai, C. & Jong, M. S. (2023). Actualization of teaching conceptions in lesson design: how teaching conceptions shape TPACK regarding spherical video-based virtual reality-supported writing instruction. *Educational Technology Research And Development*, 71(6), 2321–2344. <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10295-0>
- Chen, J., Zhou, Y. & Zhai, J. (2023). Incorporating AR/VR-assisted learning into informal science institutions: A systematic review. *Virtual Reality*, 27(3), 1985–2001. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00789-w>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2. Auflage). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Czerkawski, B. & Berti, M. (2021). Learning experience design for augmented reality. *Research in Learning Technology*, 29. <https://doi.org/10.25304/rlt.v29.2429>
- da Silva, M. M. O., Radu, I., Schneider, B., Cavalcante, P. & Teichrieb, V. (2018). An Investigation on How Teachers are Using Augmented Reality in Their Lessons. *Anais Do XXIX Simpósio Brasileiro de Informática Na Educação (SBIE 2018)*, 625–634. <https://doi.org/10.5753/cbie.sbie.2018.625>
- Depaepe, F., Verschaffel, L. & Kelchtermans, G. (2013). Pedagogical content knowledge: A systematic review of the way in which the concept has pervaded mathematics educational research. *Teaching and Teacher Education*, 34, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2013.03.001>
- DIN EN ISO 9241-11:2018-11 (2018). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. <https://dx.doi.org/10.31030/2757945>
- DIN EN ISO 9241-210:2020-03 (2020). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*. <https://dx.doi.org/10.31030/3104744>
- Döbeli Honegger, B. & Merz, T. (2015). Fachdidaktik Medien und Informatik. Ein Beitrag zur Standortbestimmung - *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung* 33(2), 256–263. <https://doi.org/10.25656/01:13889>
- Duit, R. (2007). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher, R. Gierwizd & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (S. 581–606). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34091-1_19
- Dunleavy, M., Dede, C. & Mitchell, R. (2008) Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning. *Journal Of Science Education And Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>
- Elschenbroich, HJ. & Strässer, R. (2022). Geometrie und Digitalität. In G. Pinkernell, F. Reinhold, F. Schacht, D. Walter (Hrsg.), *Digitales Lehren und Lernen von Mathematik in der Schule*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65281-7_11
- Ertmer, P. A. (1999). Addressing first- and second-order barriers to change: Strategies for technology integration. *Educational Technology Research and Development*, 47(4), 47–61. <https://doi.org/10.1007/bf02299597>
- Freese, M., Teichrew, A., Erb, R., Ullrich, M., Tremmel, M. & Winkelmann, J. (2022). Teachers' digital competence in modelling and experimenting with augmented reality. In G. S. Carvalho, A. S. Afonso & Z. Anastácio (Hrsg.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world* (Proceedings of ESERA 2021, Part 14, pp. 1146–1155). Braga, Portugal: CIEC, University of Minho.
- Freese, M., Teichrew, A., Winkelmann, J., Erb, R., Ullrich, M. & Tremmel, M. (2023). Measuring teachers' competencies for a purposeful use of augmented reality experiments in physics lessons. *Frontiers in Education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1180266>
- Freese, M., Winkelmann, J., Teichrew, A. & Ullrich, M. (2021). Nutzung von und Einstellungen zu Augmented Reality im Physikunterricht. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (S. 390–393). University of Duisburg-Essen.

- Ga, S., Cha, H. & Yoon, H. (2024). Pre-service Elementary Teachers' Technological Pedagogical and Content Knowledge in Lesson Planning and Post-lesson Reflection Discourses on Science Classes Using Virtual and Augmented Reality Content. *Journal of Science Education And Technology*, 34, 171–182. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10171-3>
- Garzón, J. & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Gonzalez, M. J. & Ruiz, I. G. (2016). Behavioural Intention and Pre-Service Mathematics Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge. *Eurasia Journal Of Mathematics Science And Technology Education*, 13(3). <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00635a>
- Graham, C. R. (2011). Theoretical considerations for understanding technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education*, 57(3), 1953–1960. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.04.010>
- Heintz, M., Law, E. L. C. & Andrade, P. (2021). Augmented Reality as Educational Tool: Perceptions, Challenges, and Requirements from Teachers. In T. De Laet, R. Klemke, C. Alario-Hoyos, I. Hilliger & A. Ortega-Arranz (Hrsg.), *Technology-Enhanced Learning for a Free, Safe, and Sustainable World: European Conference on Technology Enhanced Learning 2021 (EC-TEL 2021)* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12884, pp. 315–319). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86436-1_27
- Henze, I., van Driel, J. & Verloop, N. (2007). Science Teachers' Knowledge about Teaching Models and Modelling in the Context of a New Syllabus on Public Understanding of Science. *Research in Science Education*, 37, 99–122. <https://doi.org/10.1007/s11165-006-9017-6>
- Howard, M.C. & Davis, M.M. (2023). A Meta-analysis of augmented reality programs for education and training. *Virtual Reality*, 27(4), 2871–2894. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00844-6>
- Huwer, J., Irion, T., Kuntze, S., Schaal, S. & Thyssen, C. (2019). Von TpaCK zu DpaCK: Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. *MNU Journal*, 5, 358–364.
- Ibáñez, M. & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
- Jang, S. & Chen, K. (2010). From PCK to TPACK: Developing a Transformative Model for Pre-Service Science Teachers. *Journal Of Science Education And Technology*, 19(6), 553–564. <https://doi.org/10.1007/s10956-010-9222-y>
- Jin, Y. (2019). The Nature of TPACK: Is TPACK Distinctive, Integrative or Transformative? *Proceedings of the Society for Information Technology & Teacher Education International Conference* (S. 2199–2204). Waynesville, NC, USA.
- Kahnt, M. (2022). Die Fahrradkette als durchgängige Vorstellungshilfe im Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe I. *Plus Lucis*, (2), 14–21.
- Ke, F. & Hsu, Y. (2015). Mobile augmented-reality artifact creation as a component of mobile computer-supported collaborative learning. *The Internet and Higher Education*, 26, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.04.003>
- Kerawalla, L., Luckin, R., Seljeflot, S. & Woolard, A. (2006). “Making it real”: Exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science. *Virtual Reality*, 10(3–4), 163–174. <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0036-4>
- Kerres, M. (2018). *Mediendidaktik. Konzeption und Entwicklung digitaler Lernangebote* (5., erweiterte Auflage). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Kljun, M., Geroimenko, V., Čopič Pucihar, K. (2020). Augmented Reality in Education: Current Status and Advancement of the Field. In V. Geroimenko (Hrsg.), *Augmented Reality in Education. Springer Series on Cultural Computing* (S. 3–21). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_1
- Koehler, M. & Mishra, P. (2009). What is Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK)? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
- Koehler, M. J., Shin, T. S. & Mishra, P. (2011). How do we measure TPACK? Let me count the ways. In R. Ronau, C. Rakes & M. Niess (Eds.), *Educational Technology, Teacher Knowledge, and Classroom Impact: A Research Handbook on Frameworks and Approaches* (S. 16–31). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-60960-750-0.ch002>
- Krauss, S., Brunner, M., Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Neubrand, M. & Jordan, A. (2008). Pedagogical content knowledge and content knowledge of secondary mathematics teachers. *Journal of Educational Psychology*, 100(3), 716–725. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.3.716>
- Krauss, S., Neubrand, M., Blum, W., Baumert, J., Brunner, M., Kunter, M. & Jordan, A. (2008). Die Untersuchung des professionellen Wissens deutscher Mathematik-Lehrerinnen und -Lehrer im Rahmen der COACTIV-Studie. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 29(3–4), 223–258. <https://doi.org/10.1007/bf03339063>
- Kriek, J. (2016). A modified model of TPACK and SAMR in teaching for understanding. In G. Chamblee & L. Langub (Hrsg.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference* (S. 23–28). Savannah, GA, United States: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE).
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (5., überarbeitete Auflage). Weinheim: Beltz Juventa.
- Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (2011). *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften: Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV*. Münster: Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830974338>

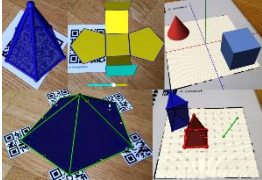
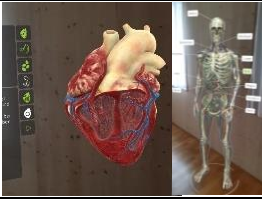
- Larcher Klee, S. & Schmidiger, P. (2021). Nationale Strategie Fachdidaktik Schweiz 2021-2028: Aktionsplan (Berichtsversion 24.11.2021) [Report]. swissuniversities. https://www.swissuniversities.ch/fileadmin/swissuniversities/Dokumente/Forschung/Fachdidaktik/NationaleStrategieFachdidaktik_Aktionsplan_211124_DE_Vswu.pdf
- Lipowsky, F. (2006). Auf den Lehrer kommt es an. Empirische Evidenzen für Zusammenhänge zwischen Lehrerkompetenzen, Lehrerhandeln und dem Lernen der Schüler. In C. Allemann-Ghionda & E. Terhart (Hrsg.), *Kompetenzen und Kompetenzentwicklung von Lehrerinnen und Lehrern* (S. 47-70). Beltz. <https://doi.org/10.25656/01:7370>
- Luik, P., Taimalu, M. & Suviste, R. (2017). Perceptions of technological, pedagogical and content knowledge (TPACK) among pre-service teachers in Estonia. *Education and Information Technologies*, 23(2), 741-755. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9633-y>
- Maderick, J. A., Zhang, S., Hartley, K. & Marchand, G. (2015). Preservice Teachers and Self-Assessing Digital Competence. *Journal Of Educational Computing Research*, 54(3), 326-351. <https://doi.org/10.1177/0735633115620432>
- Marx, C., Goeze, A. & Schrader, J. (2014). Pädagogisch-psychologisches Wissen zur Gestaltung von Lehr-Lernsituationen: (Wie) Unterscheidet es sich in Erwachsenenbildung/Weiterbildung und Schule? *Hessische Blätter für Volksbildung*, 64(3), 238-251.
- Marx, C., Goeze, A., Voss, T., Hoehne, V., Klotz, V. K. & Schrader, J. (2017). Pädagogisch-psychologisches Wissen von Lehrkräften aus Schule und Erwachsenenbildung: Entwicklung und Erprobung eines Testinstruments. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 20(S1), 165-200. <https://doi.org/10.1007/s11618-017-0733-7>
- Mayer, R. E. (2020). *Multimedia learning* (3. Auflage). New York: Cambridge University Press.
- Meisert, A. (2008). Vom Modellwissen zum Modellverständnis – Elemente einer umfassenden Modellkompetenz und deren Fundierung durch lernerseitige Kriterien zur Klassifikation von Modellen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 14, 243-261. <https://doi.org/10.25656/01:31643>
- Mena, J., Estrada-Molina, O. & Pérez-Calvo, E. (2023). Teachers' Professional Training through Augmented Reality: A Literature Review. *Education Sciences*, 13(5), 517. <https://doi.org/10.3390/educsci13050517>
- Meschede, N., Fiebranz, A., Möller, K. & Steffensky, M. (2017). Teachers' professional vision, pedagogical content knowledge and beliefs: On its relation and differences between pre-service and in-service teachers. *Teaching and Teacher Education*, 66, 158-170. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.04.010>
- Mishra, P. (2019). Considering Contextual Knowledge: The TPACK Diagram Gets an Upgrade. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, 35(2), 76-78. <https://doi.org/10.1080/21532974.2019.1588611>
- Mishra, P. & Koehler, M. J. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A new framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017-1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- Mishra, P. & Warr, M. (2021). Contextualizing TPACK within systems and cultures of practice. *Computers in Human Behavior*, 117, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106673>
- Mouza, C. (2016). Developing and Assessing TPACK Among Pre-Service Teachers: A Synthesis of Research. In M.C. Herring, M.J. Koehler & P. Mishra (Hrsg.), *Handbook of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) for Educators* (2. Auflage). New York: Routledge.
- National Academy of Engineering and National Research Council (2006). *Tech Tally: Approaches to Assessing Technological Literacy*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11691>
- Niantic, Inc. (2016). *Pokémon GO* [Mobile App]. <https://pokemongo.com/de>
- Nielsen, J. (2012). *Usability 101: Introduction to Usability*. <http://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability>
- Nikou, S. A., Perifanou, M. & Economides, A. A. (2022). Towards a teachers' augmented reality competencies (TARC) framework. In M. E. Auer & T. Tsatsos (Hrsg.), *New Realities, Mobile Systems and Applications - Proceedings of the 14th IMCL Conference: Proceedings of the 14th IMCL Conference* (S. 203-212). (Lecture Notes in Networks and Systems; Vol. 411 LNNS). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96296-8_19
- Nikou, S. A., Perifanou, M. & Economides, A. A. (2023). Development and validation of the teachers' augmented reality competences (TARC) scale. *Journal Of Computers in Education*, 11(4), 1041-1060. <https://doi.org/10.1007/s40692-023-00288-6>
- Nikou, S. A., Perifanou, M. & Economides, A. A. (2024). Exploring Teachers' Competences to Integrate Augmented Reality in Education: Results from an International Study. *TechTrends*, 68(6), 1208-1221. <https://doi.org/10.1007/s11528-024-01014-4>
- Özçakır, B. & Çakıroğlu, E. (2021a). Fostering spatial abilities of middle school students through augmented reality: Spatial strategies. *Education and Information Technologies*, 27(3), 2977-3010. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10729-3>
- Özçakır, B. & Çakıroğlu, E. (2021b). An Augmented Reality Learning Toolkit for Fostering Spatial Ability in Mathematics Lesson: Design and Development. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 9(4), 145-167. <https://doi.org/10.30935/scimath/11204>
- Perifanou, M., Economides, A. A. & Nikou, S. A. (2023). Teachers' Views on Integrating Augmented Reality in Education: Needs, Opportunities, Challenges and Recommendations. *Future Internet*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.3390/fi15010020>
- Petko, D., Döbeli Honegger, B. & Prasse, D. (2018). Digitale Transformation in Bildung und Schule: Facetten, Entwicklungslinien und Herausforderungen für die Lehrerinnen- und Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung* 36, 157-174. <https://doi.org/10.25656/01:17094>

- Porras-Hernández, L. H. & Salinas-Amescua, B. (2013). Strengthening Tpack: A Broader Notion of Context and the Use of Teacher's Narratives to Reveal Knowledge Construction. *Journal of Educational Computing Research*, 48(2), 223–244. <https://doi.org/10.2190/EC.48.2.f>
- Radu, I., Joy, T., Bott, I., Bowman, Y. & Schneider, B. (2022). A Survey of Educational Augmented Reality in Academia and Practice: Effects on Cognition, Motivation, Collaboration, Pedagogy and Applications. *Proceedings of the 2022 8th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, 1–8. <https://doi.org/10.23919/ilrn55037.2022.9815979>
- Redecker, C. (2017). *European framework for the digital competence of educators (DigCompEdu)* (EU Report No. JRC107466). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/178382>
- Reinfried, S. & Tempelmann, S. (2014). Wie Vorwissen das Lernen beeinflusst: Eine Lernprozessesstudie zur Wissenskonstruktion des Treibhauseffekt-Konzepts. *Zeitschrift für Geographiedidaktik*, 42(1), 31–56. <https://doi.org/10.18452/23977>
- Riemeier, T., Jankowski, M., Kersten, B., Pach, S., Rabe, I., Sundermeier, S., & Gropengießer, H. (2010). Wo das Blut fließt. Schülervorstellungen zu Blut, Herz und Kreislauf beim Menschen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 77–93.
- Rosenberg, J. M. & Koehler, M. J. (2015). Context and Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK): A Systematic Review. *Journal of Research on Technology in Education*, 47(3), 186–210. <https://doi.org/10.1080/15391523.2015.1052663>
- Schmid, A. M., Wetzels, R. & Brovelli, D. (2018). Augmented Reality in der Lehrpersonenbildung beim Arbeiten mit Modellen in den Naturwissenschaften. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 36(2), 223–230.
- Schmid, A.M. (2023). Authentische Kontexte für MINT-Lernumgebungen. Eine zweiteilige Interventionsstudie in den Fachdidaktiken Physik und Technik. Studien zum Physik- und Chemielernen. In M. Hopf & M. Ropohl (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen* (Band 356). Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5605>
- Schmid, M., Krannich, M., Petko, D. (2020). Technological Pedagogical Content Knowledge. Entwicklungen und Implikationen. *Journal für LehrerInnenbildung* 20(1), 116–124. <https://doi.org/10.25656/01:19396>
- Schmidthaler, E., Andic, B., Schmollmüller, M., Sabitzer, B. & Lavicza, Z. (2023). Mobile Augmented Reality in Biological Education: Perceptions of Austrian Secondary School Teachers. *Journal on Efficiency and Responsibility in Education and Science*, 16(2), 113–127. <http://dx.doi.org/10.7160/eriesj.2023.160203>
- Schulz-Zander, R. (1998). Current Trends in Information and Communication Technology Education in the German School System. In R. Schulz-Zander (Hrsg.), *Information and communication technology – Changing schools and teacher education* (S. 11–27). Dortmund: IFS-Verlag.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review* 57, 1–22. <http://dx.doi.org/10.17763/haer.57.1.j463w79r56455411>
- Sirakaya, M. & Sirakaya, D. A. (2020) Augmented reality in STEM education: a systematic review. *Interactive Learning Environments*, 30(8), 1556–1569. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1722713>
- Schödl, A. (2018). FALKO-Physik - Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften. In H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen* (Band 236). Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1137701>
- Stinken-Rösner, L., Hofer, E., Rodenhauser, A. & Abels, S. (2023). Technology Implementation in Pre-Service Science Teacher Education Based on the Transformative View of TPACK: Effects on Pre-Service Teachers' TPACK, Behavioral Orientations and Actions in Practice. *Education Sciences*, 13 (7), 732. <https://doi.org/10.3390/educsci13070732>
- Tan, L., Thomson, R., Koh, J. H. L. & Chik, A. (2023). Teaching Multimodal Literacies with Digital Technologies and Augmented Reality: A Cluster Analysis of Australian Teachers' TPACK. *Sustainability*, 15(13), 10190. <https://doi.org/10.3390/su151310190>
- Tang, A. K. (2017). Key factors in the triumph of Pokémon GO. *Business Horizons*, 60(5), 725–728. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.016>
- Teichrow, A. (2023). *Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen*, vol. 364. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5710>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Thoms, L., Kremser, E., von Kotzebue, L., Becker, S., Thyssen, C., Huwer, J., Bruckermann, T., Finger, A. & Meier, M. (2022). A framework for the digital competencies for teaching in science education—DiKoLAN. *Journal Of Physics Conference Series*, 2297(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2297/1/012002>
- Thyssen, C., Huwer, J., Irion, T. & Schaal, S. (2023). From TPACK to DPACK: The „Digitally-Related Pedagogical and Content Knowledge“-Model in STEM-Education. *Education Sciences*, 13(8), 769. <https://doi.org/10.3390/educsci13080769>
- Todorova, M., Sunder, C., Steffensky, M. & Möller, K. (2017). Pre-service teachers' professional vision of instructional support in primary science classes: How content-specific is this skill and which learning opportunities in initial teacher education are relevant for its acquisition? *Teaching and Teacher Education*, 68, 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.08.016>

- Tondeur, J., van Braak, J., Ertmer, P.A. & Ottenbreit-Leftwich, A. (2016). Understanding the relationship between teachers' pedagogical beliefs and technology use in education: A systematic review of qualitative evidence. *Educational Technology Research And Development*, 65(3), 555–575. <https://doi.org/10.1007/s11423-016-9481-2>
- Trust, T., Woodruff, N., Checrallah, M. & Whalen, J. (2021). Educators' Interests, Prior Knowledge and Questions Regarding Augmented Reality, Virtual Reality and 3D Printing and Modeling. *TechTrends*, 65(4), 548–561. <https://doi.org/10.1007/s11528-021-00594-9>
- Tuli, N. & Mantri, A. (2020). Evaluating Usability of Mobile-Based Augmented Reality Learning Environments for Early Childhood. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(9), 815–827. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1843888>
- Tzima, S., Styliaras, G. & Bassounas, A. (2019). Augmented Reality Applications in Education: Teachers' Point of View. *Education Sciences*, 9(2), 99. <https://doi.org/10.3390/educsci9020099>
- Upmeyer zu Belzen, A. & Krüger, D. (2010). Modellkompetenz im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 41–57. <https://doi.org/10.25656/01:31676>
- van Es, E. A. & Sherin, M. G. (2008). Mathematics teachers' „learning to notice“ in the context of a video club. *Teaching and Teacher Education*, 24(2), 244–276. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2006.11.005>
- van Driel, J. H., Beijaard, D. & Verloop, N. (2001). Professional development and reform in science education: The role of teachers' practical knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(2), 137–158. [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200102\)38:2<137::AID-TEA1001>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200102)38:2<137::AID-TEA1001>3.0.CO;2-U)
- Vidak, A., Movre Šapić, I., Mešić, V. & Gomzi, V. (2024). Augmented reality technology in teaching about physics: a systematic review of opportunities and challenges. *European Journal of Physics*, 45(2), 23002. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad0e84>
- von Kotzebue, L., Meier, M., Finger, A., Kremser, E., Huwer, J., Thoms, L., Becker, S., Bruckermann, T. & Thyssen, C. (2021). The Framework DiKoLAN (Digital Competencies for Teaching in Science Education) as Basis for the Self-Assessment Tool DiKoLAN-Grid. *Education Sciences*, 11(12), 775. <https://doi.org/10.3390/educsci11120775>
- Voogt, J., Fisser, P., Pareja Roblin, N., Tondeur, J. & van Braak, J. (2012). Technological pedagogical content knowledge – a review of the literature. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29(2), 109–121. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2012.00487.x>
- Wang, Q. & Li, Y. (2024). How virtual reality, augmented reality and mixed reality facilitate teacher education: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(3), 1276–1294. <https://doi.org/10.1111/jcal.12949>
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_6
- Willermark, S. (2017). Technological Pedagogical and Content Knowledge: A Review of Empirical Studies Published From 2011 to 2016. *Journal Of Educational Computing Research*, 56(3), 315–343. <https://doi.org/10.1177/0735633117713114>
- Wilson, M. L., Ritzhaupt, A. D. & Cheng, L. (2020). The impact of teacher education courses for technology integration on pre-service teacher knowledge: A meta-analysis study. *Computers & Education*, 156, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103941>
- Wirtz, M. & Casper, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität. Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen*. Hogrefe.
- Zraggen, J. (2023). Digitale pädagogische Inhaltskompetenzen gestalterisch aufbauen mit Augmented und Virtual Reality. *MedienPädagogik Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 51, 170–190. <https://doi.org/10.21240/mpaed/51/2023.01.17.x>
- Zimmermann, F., Melle, I. & Huwer, J. (2021). Developing Prospective Chemistry Teachers' TPACK—A Comparison between Students of Two Different Universities and Expertise Levels Regarding Their TPACK Self-Efficacy, Attitude, and Lesson Planning Competence. *Journal Of Chemical Education*, 98(6), 1863–1874. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01296>

Appendizes

Appendix 1: Überblick über die sechs Augmented-Reality-Applikationen der Studie

Titel	Entwicklung	Screenshots	Kurzbeschreibung
Sólidos RA	Amorim & de Oliveira Freitas (2023), für die Studie ins Deutsche übersetzt		Die App Sólidos RA nutzt Augmented Reality, um geometrische Körper interaktiv zu visualisieren, zu manipulieren und zu erstellen. Sie bietet fünf verschiedene Modi: - Visualisieren: Interaktive Darstellung von 42 Körpern - Netze: Animation der Entfaltung von sechs Körpern - Erstellen: Eigenständige Konstruktion von 3D-Objekten - Modellieren: Umwandlung zweidimensionaler Formen in dreidimensionale - Geobrett: Virtuelles Geobrett zur Konstruktion von Linien, Flächen und 3D-Körpern
SPATIAL AR	Özçakır & Çakıroğlu (2021a, 2021b), für die Studie ins Deutsche übersetzt		Die App SPATIAL AR setzt Augmented Reality ein, um das räumliche Vorstellungsvermögen von Schüler*innen zu fördern. In der dazugehörigen Aufgabensammlung sollen die Schüler*innen verschiedene Würfelkörper durch Bewegung um das Objekt entdecken. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf den unterschiedlichen Ansichten des Objekts.
Blutgruppenverträglichkeit	Basierend auf einer Idee von Vivien Wilzbach, für die Studie in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern neu entwickelt		Die App AR Blutgruppenverträglichkeit nutzt Augmented Reality zur Visualisierung und Analyse der Blutgruppen. Durch das Zusammenschieben zweier Blutgruppen wird eine Animation ausgelöst, die mithilfe der Darstellung von Blutkörperchen und Antikörpern zeigt, ob es zu einer Verklumpung (Agglutination) kommt oder ob die Blutgruppen kompatibel sind.
Insight Heart	ANIMA RES (2022), keine Anpassungen für die Studie		Die App Insight Heart nutzt Augmented Reality, um das menschliche Herz als interaktives 3D-Modell im Raum darzustellen und erlebbar zu machen. Ein virtueller Assistent erläutert multimedial verschiedene Krankheitsbilder wie Herzinfarkt, Bluthochdruck und Vorhofflimmern.
AR Stromkreismodelle	Schmid et al. (2018), für die Studie in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern weiterentwickelt		Die App AR Stromkreismodelle nutzt Augmented Reality, um ein reales Stromkreisexperiment durch drei verschiedene Stromkreismodelle zu erweitern: das offene und geschlossene Wasserkreislaufmodell sowie das Fahrradkettenmodell. Die Modelle passen sich dabei dynamisch dem real aufgebauten Stromkreis an.
AR Papierstromkreise	Für die Studie in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern neu entwickelt		Die App AR Papierstromkreise simuliert mithilfe von Augmented Reality ein Stromkreisexperiment mit Netzgerät und Messgerät. Durch das Scannen von Markern, die elektrische Bauteile wie Leitungen oder Glühlampen repräsentieren, lassen sich virtuelle Stromkreise aufbauen und interaktiv erkunden.

Appendix 2: Kategoriensystem mit inhaltlicher Beschreibung, Beispiel und den absoluten und relativen Häufigkeiten

	Kategorie	Inhaltliche Beschreibung	Beispiel (nur für Subkategorien der untersten Ebene)	H_{7126}	b_{7126}
	1. Kontextwissen (XK)	Wissen zu allgemeinen Rahmenbedingungen des Unterrichtens auf der Mikro- (Lernende), Meso- (Schule) und Makroebene (Bildungspolitik und Gesellschaft), welche eine Lehrperson nicht direkt beeinflussen kann (z. B. Verfügbarkeit von technischen Geräten, Räumlichkeiten oder Finanzen)		402 ^a	.056 ^a
	1.1. Kontextwissen auf der Mikroebene	Wissen über die Voraussetzungen der Lernenden, insbesondere in Bezug auf die Nutzung von Technologien und Materialien	„Es verfügen genügend SuS über ein Android-Handy, damit sie sicher in 2er- bis maximal 3er-Gruppen arbeiten können.“ (274, Pos. 23)	77	.011
	1.2. Kontextwissen auf der Mesoebene	Wissen über die Rahmenbedingungen der Schule, insbesondere welche technischen Geräte, Materialien, Räumlichkeiten, Budgets etc. in der Schule verfügbar sind und welche Visionen und Strategien damit verfolgt werden	„Es hängt ganz davon ab, ob ich ein Gerät zur Verfügung hätte, auf dem ich die App herunterladen kann. Von der Schule erhalten wir aktuell kein Android-Gerät.“ (287; Pos. 19)	320	.045
	1.3. Kontextwissen auf der Makroebene	Wissen über die Rahmenbedingungen der Bildungspolitik und Gesellschaft, insbesondere welche Rolle Technologien aktuell in Lehrplänen oder bildungspolitischen Überlegungen spielen sowie Wissen zu aktuellen Megatrends der Mediatisierung und Automatisierung, die in allen Bereichen der Gesellschaft zu großen Umwälzungen führen (z. B. veränderte Berufsanforderungen)	„Die Welt wird immer digitaler, (...)“ (130; Pos. 12)	5	.001
	2. Technologisches Wissen (TK)	Wissen zu verschiedenen relevanten digitalen Medien und Technologien (bspw. Notebooks oder Tablets). Dies umfasst einerseits Anwendungswissen (Kenntnisse zur Bedienung der Geräte) und andererseits konzeptionelles Hintergrundwissen (Wissen zur Funktionsweise digitaler Technologien, etwa zum Aufbau eines Computers).		1170 ^a	.164 ^a
	2.1. Anwendungswissen	Anwendungswissen umfasst für technische Geräte wie Notebooks oder Tablets beispielsweise Kenntnisse zur Bedienung der Geräte, zum Installieren von Programmen, zur Nutzung und Erstellung von Inhalten (z. B. Videos, Internetseiten) oder zum Beheben von technischen Problemen	„Die App kann jegliche QR-Codes sehr schnell analysieren und es funktioniert sehr gut, dass der Stromkreis erkannt wird.“ (123; Pos. 12)	1169	.164
	2.2. Konzeptionelles Hintergrundwissen	Wissen zur Funktionsweise digitaler Technologien, etwa dem Aufbau eines Computers, zu unterschiedlichen Datenstrukturen	„(AR, nicht zu verwechseln mit VR...)“ (408; Pos. 14)	1	.000

		oder zu Möglichkeiten und Grenzen der algorithmischen Datenverarbeitung			
	3. Technologiebezogenes fachliches Wissen (TCK)	Wissen, wie Technologien in den Hintergrunddisziplinen des Schulfachs eingesetzt werden und wie sie die Disziplin verändern (z. B. bildgebende Verfahren in der Medizin). Sowie Wissen darüber, welche Möglichkeiten oder Einschränkungen Technologien (hier spezifisch die App) in Bezug auf den Fachinhalt haben		450 ^a	.063 ^a
	3.1. Wissen über Technologien in Hintergrunddisziplinen	Wissen, wie Technologien in den Hintergrunddisziplinen des Schulfachs zur Wissensgenerierung, Wissensrepräsentation, Wissensnutzung und Wissenskommunikation eingesetzt werden und wie sie die Disziplin verändern (z. B. bildgebende Verfahren in der Medizin)	„Der Umgang der modernen Technik wird in einem physikalischen Bereich geübt; dies wiederum hat einen Lebensweltbezug, da gewisse Berufe auch mit Tablets u. ä. arbeiten um Stromkreise zu messen.“ (147; Pos. 15)	3	.000
	3.2. Wissen über Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen	Wissen darüber, welche Möglichkeiten oder Einschränkungen Technologien (hier spezifisch die App) in Bezug auf den Fachinhalt haben	„Es gibt nur zwei Buchsen und eine Doppelbuchse für den ganzen Aufbau. Man kann also nicht an mehreren Stellen die Spannung und die Stromstärke messen ohne Buchsen wieder einbauen zu müssen und ggf. den Stromkreislauf wieder neu scannen zu müssen.“ (280, Pos. 17)	447	.063
	4. Technologiebezogenes pädagogisches Wissen (TPK)	Mediendidaktisches/medienspsychologisches (im Sinne eines „Lernens mit Medien“), sowie medienerzieherisches/medienbildnerisches Wissen (im Sinne eines „Lernens über Medien“)		1338 ^a	.188 ^a
	4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen	Wissen über die Verwendung, Gestaltung und Wirkung von digitalen Medien in Lehr- und Lernsituationen (im Sinne eines „Lernens mit Medien“)	„Die App ist einfach zu bedienen und übersichtlich gestaltet, somit also auch ideal für die SuS und die Anwendbarkeit im Unterricht.“ (127; Pos. 12)	1328	.186
	4.2. Medienerzieherisches/ Medienbildnerisches Wissen	Wissen über Gestaltungsmöglichkeiten von Medien (schriftliche Texte, Bilder etc.), über Medieneinflüsse (z. B. auf Wertorientierungen) und über Bedingungen der Medienproduktion und Medienverbreitung (z. B. rechtlich und ökonomisch) (im Sinne eines „Lernens über Medien“)	„Förderung von digitalem Arbeiten durch App.“ (160; Pos. 15)	10	.001
	5. Pädagogisches Wissen (PK)	Wissen über allgemeine, fachunabhängige Prinzipien des Unterrichtens und der Klassenorganisation		1055 ^a	.148 ^a
	5.1. Wissen über Lernprozesse von Lernenden	Wissen über die Art und Weise, wie SuS lernen, Kenntnisse über die mit Lernen verbundenen kognitiven, motivationalen und emotionalen Prozesse	„Es entsteht Neugierde auf das was beim Einschalten des Netzgerätes passieren wird. Dies fördert bei den Lernenden, den Fokus auf den Lerninhalt = den Stromkreis zu legen. Neugierde erzeugt Spaß am weiteren Erkunden.“ (418; Pos. 12)	64	.009

5.2. Wissen über Heterogenität der Lernenden	Wissen über die vielfältigen individuellen Unterschiede in Bezug auf Fähigkeiten, Hintergründe und Lernstile der Lernenden	„Bei größeren Kreisen, besonders solchen, die ‚Leerräume‘ haben, wird das schöne Zusammenbauen leicht knifflig; für SuS mit feinmotorischen Schwierigkeiten evtl. nur kleinere geeignet.“ (315; Pos. 16)	9	.001
5.3. Wissen über Lehr-Lernmethoden und -konzepte	Wissen über verschiedene pädagogische Ansätze, Techniken und Methoden zur effektiven Vermittlung von Wissen und Fähigkeiten	„Man kann selber Entscheidungen treffen und in einem eigenen Tempo arbeiten. Man entscheidet selbst, ob und welche Karten man austauscht.“ (154; Pos. 28)	136	.019
5.4. Wissen über Lehr- und Lernziele	Wissen über Lehr- und Lernziele, unter anderem Lernzieltaxonomien und Lernzielkategorien	„Dies würde der Lehrperson auch aufzeigen, wie gut die Schülerinnen und Schüler das Thema begriffen haben, weil dies eine relativ anspruchsvolle Taxonomiestufe nach Bloom wäre.“ (122; Pos. 20)	2	.000
5.5. Wissen über Führung von Lerngruppen	Wissen zur Organisation und Lenkung von Lerngruppen, um ein effektives Lernumfeld zu schaffen	„Da viel Eigenverantwortung der SuS vorgesetzt wird, sollten die LP gerade zu Beginn klare Anweisungen geben.“ (130; Pos. 13)	4	.001
5.6. Wissen über Kommunikation und Interaktion mit Lernenden	Wissen über eine effektive Kommunikation und förderliche Interaktion für ein positives Lernklima	„Ich übernehme eine Coachingrolle, gebe Rückmeldungen und achte auf eine gute Zusammenarbeit in den Gruppen.“ (selbst erstellt)	1	.000
5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen	Wissen über die Schaffung von physischen und virtuellen Lernräumen sowie Gestaltung von Lernmaterialien, um den Lernprozess zu unterstützen und das Engagement der Lernenden zu fördern	„Ich würde auch vorbereitend die Kärtchen sortieren und nach Bausteinen ordnen, damit die SuS nicht zu viel Zeit verlieren beim Durchsuchen des Kartenstapels.“ (165; Pos. 23)	835	.117
5.8. Wissen über Individual- und Lernprozessdiagnostik	Wissen zur Analyse individueller Lernprozesse, unter anderem der Erfassung von Leistungen, Motivationen oder Emotionen	„SuS schreiben ein Fazit gut - neutral - negativ - Jede Gruppe lädt ihr Dokument auf OneNote.“ (408; Pos. 14)	4	.001
6. Fachliches Inhaltswissen (CK)	Wissen über den Lehrstoff an sich (Konzepte, Theorien etc.)		75 ^a	.011 ^a
6.1. Fakten: Verbalisierbares Wissen	Verbalisierbares und für die Fachdomäne relevantes Wissen (im Sinne von „Wissen, dass...“)	„Beim Messgerät für die Spannung V wird nur von ‚Strom‘ gesprochen, das ist ein eher unklarer Begriff.“ (137; Pos. 17)	54	.008
6.2. Fertigkeiten: Implizites Handlungswissen	Implizites, also nicht verbalisierbares Handlungswissen, von basalen Verhaltensweisen (Aussprache) bis zu komplexen Routinen und Handlungsmustern (im Sinne von „Wissen, wie...“)	„Das Messgerät kann ‚falsch‘ angeschlossen werden und misst dann im Minusbereich.“ (165; Pos. 15)	20	.003
6.3. Konzepte: Vernetztes Begriffswissen	Vielfach vernetztes Begriffswissen, welches sowohl verbalisiert als auch implizit vorliegen kann (im Sinne von „Wissen, warum...“)	„Halbierung der Ampereangabe (Stromstärke) & Gleichbleiben der Voltangabe (Spannung) kann bei Serieschaltung beobachtet werden.“ (78; Pos. 28)	1	.000
7. Fachdidaktisches Wissen (PCK)	Wissen zum Lehren und Lernen im jeweiligen Schulfach (Fachwissen vermitteln, Lerngelegenheiten zur Kompetenzentwicklung schaffen)		1287 ^a	.181 ^a

7.1. Wissen über das Potenzial von Aufgaben	Wissen über die kognitiven Anforderungen und impliziten Wissensvoraussetzungen, ihre didaktische Sequenzierung und die langfristige curriculare Anordnung von Stoffen. Sowie Wissen über den möglichen Beitrag einer Aufgabe zur erfolgreichen Wissenskonstruktion der Schüler*innen		486 ^a	.068 ^a
7.1.1. Anspruchsniveau	Wissen zum Anspruchsniveau der Aufgabe in Bezug auf die Zielstufe insgesamt oder einzelne Schüler*innen (z. B. zur Binnendifferenzierung) sowie Passung des Anspruchsniveaus der Aufgabe zu Lehrmitteln oder dem Lehrplan	„Die App ‚Insight Heart‘ dagegen ist sehr komplex und anspruchsvoller in der Bedienung, vermittelt Wissen ohne direkten Auftrag dazu und stellt die grundlegenden Prozesse, die im Sek1-Unterricht im Vordergrund stehen, nicht separat dar, so dass das hier angebotene Wissen insgesamt über den regulären Unterricht hinaus geht.“ (287; Pos. 16)	150	.021
7.1.2. Nötiges Vorwissen	Wissen zum nötigen fachlichen Vorwissen der Schüler*innen für den Einsatz der App und Ideen, wie das nötige Wissen im Vorfeld aufgebaut werden kann	„Bevor ich mit dieser App arbeiten würde, würde ich sicherstellen, dass die Grundlagen in der Klasse vorhanden sind (Begrifflichkeiten wie Widerstand bzw. Ohm oder die Zeichen in einem Stromkreis - z. B. für eine Lichtquelle).“ (162; Pos. 20)	58	.008
7.1.3. Lerninhalt	Wissen zum Lerninhalt der App, also was die Schüler*innen damit (nicht) lernen können sowie Wissen zur Anwendungsbreite der App, also für welche Themen/Aktivitäten die App (nicht) genutzt werden kann	„Ich finde AR Stromkreismodelle sehr gut um die Basics von Widerständen anzuschauen. Allerdings sehe ich, dass AR Papierstromkreise, wenn man es richtig macht, in allen Teilen dieses Thema Stromkreis (WS, Schalter, Kreis, Ampère, volt...) eingesetzt werden kann, da die Bausteine auch ein Voltmeter zum Beispiel einbauen können.“ (202; Pos. 32)	278	.039
7.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen	Wissen über fachbezogene Schüler*innenkognitionen (Fehlkonzeptionen, typische Fehler, Schwierigkeiten, Strategien, Vorstellungen und Überzeugungen) sowie über die Diagnose von Schüler*innenwissen (u. a. Vorwissen) und Verständnisprozessen und geeignete Reaktionen auf Schüler*innenantworten und -fehler		56 ^a	.008 ^a
7.2.1. Interesse	Wissen über Interessen oder Motivationen der Schüler*innen in Bezug auf das Fachthema	„Einige SuS würden sicher lieber mit ‚richtigen‘ Stromkästen experimentieren, da sie dies vielleicht schon gut können (von Zuhause, Beruf vom Vater o. ä.) oder gern mit Fingerspitzengefühl ausprobieren würden.“ (162; Pos. 17)	19	.003
7.2.2. Typische Schwierigkeiten und Fehler	Wissen über häufige Schwierigkeiten oder typische Fehler von Schüler*innen bei diesem Fachthema sowie geeignete Reaktionen auf Schüler*innenantworten und -fehler	„Ohne Einführung können die SuS die Spannung zu hoch einstellen und die Lämpchen kaputt machen.“ (317; Pos. 13)	30	.004

7.2.3. Schüler*innenvorstellungen	Wissen über Schüler*innen-Vorstellungen vor, während oder nach dem Unterricht sowie geeignete Reaktionen auf Schüler*innenvorstellungen	„Auch finde ich super, dass erkennbar (wenn nicht sogar erlebbar) wird, dass es bei der Spende um die roten Blutkörperchen (und somit nicht um die Antikörper) geht. Häufig ist hier nämlich eine Fehlvorstellung bei den Lernenden vorhanden, die durch den in der App dargestellten Prozess behoben werden können.“ (287; Pos. 9)	5	.001
7.2.4. Diagnose von Schüler*innenwissen	Wissen über die Diagnose von Schüler*innenwissen (u. a. Vorwissen) und Verständnisprozessen mit Fachbezug	„Ein Unterschied ist erst festzustellen, wenn die SuS in ihrem Wissen so sattelfest sind, sodass sie möglichst große oder vielfältige Stromkreise herstellen möchten und daraufhin mit Stromstärke und weiteren Angaben oder weiteren Messgeräten experimentieren möchten.“ (318; Pos. 23)	2	.000
7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten	Wissen über spezifisch fachbezogene Darstellungsaktivitäten und Interventionsmöglichkeiten der Lehrperson, die zur Unterstützung der aktiven Wissenskonstruktionsprozesse der Schüler*innen dienen		745 ^a	.105 ^a
7.3.1. Modellkompetenz	Fähigkeiten, mit Modellen zweckbezogen Erkenntnisse gewinnen zu können und über Modelle mit Bezug auf ihren Zweck urteilen zu können, die Fähigkeiten, über den Prozess der Erkenntnisgewinnung durch Modelle und Modellierungen zu reflektieren sowie die Bereitschaft, diese Fähigkeiten in problemhaltigen Situationen anzuwenden		95 ^a	.013 ^a
7.3.1.1. Modellwissen und -arbeit	- Modellwissen: Kenntnis grundlegender Modelle, die den Lernenden im Sinne eines fundierten Fachwissens Zugänge zu den entsprechend modellbasierten Konzepten des Fachinhalts eröffnen - Modellarbeit: Nutzung von Modellen in Erkenntnisprozessen, sowie Fähigkeit zur eigenen Entwicklung und Weiterentwicklung von Modellen	„Ich persönlich bin ein großer Fan vom Fahrradkettenmodell, jedoch stößt dies bei Konzepten wie einer Parallelschaltung an seine Grenzen, was man den SuS kommunizieren muss.“ (260; Pos. 26)	88	.012
7.3.1.2. Modellverständnis	Wissen über die Bedeutung von Modellen und Modellarbeit (übergeordnete Dimension), Teil eines adäquaten Nature of Science-Konzepts (Rolle und Wesen von Modellen)	„Keines der Modelle (Modelle = vereinfachte Version der Wirklichkeit) kann alle Eigenschaften eines Stromkreises korrekt wiedergeben, daher ist es bereichernd, verschiedene Modelle zu verwenden und miteinander zu vergleichen.“ (344; Pos. 12)	7	.001
7.3.2. Visualisierung	Wissen zur Visualisierung/Veranschaulichung des Fachinhalts		277 ^a	.039 ^a
7.3.2.1. Repräsentationsformen	Wissen über Repräsentationsformen, also der Darstellung eines Lerngegenstands auf drei verschiedene Arten (enaktiv, ikonisch, symbolisch)	„Die Darstellung auf den Plättchen ist die selbe wie bei einem Plan. Es kann eine Verbindung zwischen dem geplanten und der Realität hergestellt werden. Umgekehrt, kann	15	.002

			man von der Lebenswelt nahen Darstellung auf den Plan führen --> Enaktiv zu Ikonisch.“ (132; Pos. 15)		
	7.3.2.2. Multiple Repräsentationen	Wissen zur Bedeutung multipler Repräsentationen (verschiedene Darstellungsformen), um komplexe Konzepte lernwirksam zu vermitteln	„Es gibt mehrere Visualisierungstypen (Fahrradkette, Wasserkreislauf mit Turbinen oder Wasserkreislauf mit Wasserfällen).“ (122; Pos. 12)	34	.005
	7.3.2.3. Allgemeine Visualisierungshinweise	Wissen zur Visualisierung/Veranschaulichung des Fachinhalts	„Ich sehe beim Herzinfarkt eine braune Vene als Ort der abgestorbenen Myokard Bereiche. Das kann zu Fehlkonzepten führen.“ (243; Pos. 14)	228	.032
	7.3.3. Erklärungen	Wissen über Qualitätsaspekte von Erklärungen zu Fachinhalten	„Eine kurze Erklärung was genau bei der Blutspende passiert wäre sinnvoll für das weitere Verständnis gewesen. So hat man zwar gesehen, dass bei der Verträglichkeit und bei der Unverträglichkeit unterschiedliches passiert, jedoch wurde nicht gesagt was oder wieso das so passiert. Es kann lediglich gelernt werden, welche Blutgruppen sich vertragen und welche nicht, jedoch lernt man nicht wieso das so ist oder was bei diesem Vorgang passiert.“ (19; Pos. 24)	183	.026
	7.3.4. Realitätsbezug	Wissen über den Bezug zur realen Welt von Darstellungen, Werkzeugen usw. und zur Wichtigkeit des Realitätsbezugs	„Trotzdem fehlt der ‚reale‘ Umgang mit Strom, bei dem direkt auch Sicherheitsaspekte besprochen werden können.“ (365; Pos. 15)	86	.012
	7.3.5. Unterrichtsplanung und -begleitung	Wissen über Unterrichtsplanung und -begleitung im Fachunterricht	„Im Thema Körper in der 7. Klasse würde ich zunächst das Blut allgemein thematisieren. Also Blutkreislauf, wie Blut zusammengesetzt ist etc. Dann würde ich eine Sequenz planen, bei der die SuS schon wissen, dass man Blut spenden kann und dass aber nicht jede Person einer beliebigen anderen Person spenden kann. Weil wir unterschiedliche Blutgruppen haben.“ (237, Pos. 17)	104	.015
	8. Technologiebezogenes fachdidaktisches Wissen (TPACK)	Wissen darüber, wie eine bestimmte Technologie in einem bestimmten Fachgebiet didaktisch sinnvoll eingesetzt werden kann		1349 ^a	.189 ^a
	8.1. Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium	Wissen über den möglichen Beitrag einer Aufgabe mit dem Medium zur erfolgreichen Wissenskonstruktion der Schüler*innen	„AR Stromkreismodelle enthält für mich einfach den größeren Mehrwert. Während AR Papierstromkreise sehr gut die elektrischen Bauteile simuliert, kann ich seine Funktionen auch einfach physisch nachbilden. Auf der anderen Seite ist es eher schwer, einfach so ein Wasserkreislauf-Modell analog zu einem Schaltplan so aufzuzeichnen, dass die SuS daraus einen visuellen Nutzen erfahren. Rein um das Konzept eines Stromkreises zu erklären, ist AR Stromkreismodelle sehr anschaulich, auch wenn auf gewisse	920	.129

			Stolperstellen eingegangen werden muss.“ (260; Pos. 32)		
	8.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen in Verbindung mit dem Medium	Wissen über fachbezogene Schüler*innenkognitionen (Fehlkonzeptionen, typische Fehler, Schwierigkeiten, Strategien, Vorstellungen und Überzeugungen) sowie über die Diagnose von Schüler*innenwissen (u. a. Vorwissen) und Verständnisprozessen und geeignete Reaktionen auf Schüler*innenantworten und -fehler in Verbindung mit dem Medium	„Für manche SuS könnte der Transfer des digitalen Stromkreises hin zur realen Darstellung eines komplexen Stromkreises schwierig sein, bzw. nicht hergestellt werden. Ich würde deshalb nicht ausschließlich auf diese App zurückgreifen, sondern diese als Veranschaulichung und Übungsmöglichkeit verwenden.“ (162; Pos. 17)	64	.009
	8.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten mit dem Medium	Wissen über spezifisch fachbezogene Darstellungsaktivitäten und Interventionsmöglichkeiten der Lehrperson mit dem Medium, die zur Unterstützung der aktiven Wissenskonstruktionsprozesse der Schüler*innen dienen	„Ich würde einmal mit der Stromstärke und den Serie-Schaltungen starten und diese anhand des Fahrrad-Modells anschauen. Die SuS schauen zuerst was mit den Lämpchen passiert, wenn sie alleine stehen und dann was passiert wenn ein zweites Lämpchen seriegeschaltet dazukommt. Die Begründung können sie zuerst selbst mit dem Fahrradmodell (im App) versuchen, dies wird dann gemeinsam angeschaut. Danach würde ich die Spannung anhand des offenen Wasserkreislaufs anschauen. Dabei würde zuerst wieder die Serieschaltung betrachtet werden (mit den Lichtern ohne App) und danach mit der App und dem Wasserkreislauf. Die Begründung erfolgt wieder gemeinsam. Die LP fragt nun was passiert, wenn man sie parallel schaltet, die SuS beobachten die Lämpchen und schauen dann wie sie es mit dem offenen Wasserkreislauf erklären könnten.“ (78; Pos. 33)	365	.051

^a aus mehreren Subkategorien aggregierte Werte

Appendix 3: Fachbeurteilungsvergleich der Codehäufigkeiten der TPACK-Wissensbereiche (Kruskal-Wallis-Tests, Post-hoc: Dunn-Tests mit Bonferroni-Korrektur)

TPACK-Wissensbereich	Mathematik ($n = 123$) - Physik ($n = 138$)	Mathematik ($n = 123$) - Biologie ($n = 157$)	Biologie ($n = 157$) - Physik ($n = 138$)
XK ($H = 26.861, p < .001$)		$\chi^2 = -4.510, p < .001, r = -.270$	$\chi^2 = 4.321, p < .001, r = .252$
TK ($H = 7.023, p = .030$)	$\chi^2 = 2.575, p = .030, r = .159$		
TCK ($H = 47.049, p < .001$)		$\chi^2 = 5.293, p < .001, r = .316$	$\chi^2 = -6.288, p < .001, r = -.366$
TPK ($H = 85.688, p < .001$)	$\chi^2 = 6.085, p < .001, r = .377$	$\chi^2 = -2.538, p = .033, r = -.152$	$\chi^2 = 9.085, p < .001, r = .529$
PK ($H = 77.960, p < .001$)	$\chi^2 = -4.841, p < .001, r = -.300$	$\chi^2 = 3.558, p = .001, r = -.213$	$\chi^2 = -8.816, p < .001, r = -.513$
CK ($H = 9.184, p = .010$)	$\chi^2 = -2.959, p = .009, r = -.183$		
PCK ($H = 75.076, p < .001$)	$\chi^2 = -8.518, p < .001, r = -.527$	$\chi^2 = -5.968, p < .001, r = -.357$	$\chi^2 = -2.894, p = .011, r = -.169$
TPACK ($H = 10.652, p = .005$)		$\chi^2 = 3.123, p = .005, r = .187$	

Effektstärke nach Cohen (1988): klein ($r = .1$ bis $.3$), **mittel** ($r = .3$ bis $.5$), **stark** ($r = .5$ und höher)

Unterschied auch bei Wilcoxon-Tests (siehe Appendix 4)

Appendix 4: Fachbeurteilungsvergleich der Codehäufigkeiten der TPACK-Wissensbereiche (zweiseitige Wilcoxon-Tests)

TPACK-Wissensbereich	Mathematik & Physik ($n = 23$)	Mathematik & Biologie ($n = 35$)	Biologie & Physik ($n = 20$)
XK			
TK			$\chi^2 = -2.737, p = .005, r = -.612$ $Mdn_{Bio} = 2.50, Mdn_{Ph} = 1.00$
TCK			$\chi^2 = -2.693, p = .006, r = -.602$ $Mdn_{Bio} = 0.00, Mdn_{Ph} = 1.00$
TPK	$\chi^2 = -3.319, p < .001, r = -.692$ $Mdn_{Ma} = 4.00, Mdn_{Ph} = 1.00$		$\chi^2 = -3.648, p < .001, r = -.812$ $Mdn_{Bio} = 4.50, Mdn_{Ph} = 1.00$
PK	$\chi^2 = -2.449, p = .013, r = -.511$ $Mdn_{Ma} = 1.00, Mdn_{Ph} = 3.00$	$\chi^2 = -3.590, p < .001, r = .607$ $Mdn_{Ma} = 2.00, Mdn_{Bio} = 1.00$	$\chi^2 = -2.883, p = .003, r = -.645$ $Mdn_{Bio} = 1.00, Mdn_{Ph} = 2.00$
CK			
PCK	$\chi^2 = -2.304, p = .020, r = -.480$ $Mdn_{Ma} = 1.00, Mdn_{Ph} = 3.00$	$\chi^2 = -2.344, p = .018, r = -.396$ $Mdn_{Ma} = 1.00, Mdn_{Bio} = 2.00$	
TPACK		$\chi^2 = -2.820, p = .004, r = -.477$ $Mdn_{Ma} = 4.00, Mdn_{Bio} = 3.00$	

Effektstärke nach Cohen (1988): klein ($r = .1$ bis $.3$), **mittel** ($r = .3$ bis $.5$), **stark** ($r = .5$ und höher)

Unterschied auch bei Kruskal-Wallis-Tests (siehe Appendix 3)

Appendix 5: Fachbeurteilungsvergleich der Codehäufigkeiten der Subkategorien (zweiseitige Wilcoxon-Tests)

TPACK-Wissensbereich	Mathematik & Physik ($n = 23$)	Mathematik & Biologie ($n = 35$)	Biologie & Physik ($n = 20$)
TCK			<u>3.2. Wissen über Möglichkeiten von Technologien in Bezug auf Fachwissen</u> ($\chi = -2.693, p = .006, r = -.602; Mdn_{Bio} = 0.00, Mdn_{Ph} = 1.00$)
TPK	<u>4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen</u> ($\chi = -3.264, p < .001, r = -.681; Mdn_{Ma} = 4.00, Mdn_{Ph} = 1.00$)		<u>4.1. Mediendidaktisches/ Medienpsychologisches Wissen</u> ($\chi = -3.648, p < .001, r = -.816; Mdn_{Bio} = 4.50, Mdn_{Ph} = 1.00$)
PK	<u>5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen</u> ($\chi = -2.045, p = .045, r = -.426; Mdn_{Ma} = 1.00, Mdn_{Ph} = 2.00$)	<u>5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen</u> ($\chi = -3.696, p < .001, r = -.625; Mdn_{Ma} = 1.00, Mdn_{Bio} = 0.00$)	<u>5.7. Wissen über Gestaltung von Lernumgebungen</u> ($\chi = -3.145, p < .001, r = -.703; Mdn_{Bio} = 0.00, Mdn_{Ph} = 2.00$)
PKK	<u>7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten</u> ($\chi = -3.174, p < .001, r = -.662; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Ph} = 2.00$) ^a <u>7.3.1. Modellkompetenz</u> ($\chi = -2.414, p = .016, r = -.503; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Ph} = 0.00$) ^a <u>7.3.1.1. Modellwissen und -arbeit</u> ($\chi = -2.414, p = .016, r = -.503; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Ph} = 0.00$) <u>7.3.4. Realitätsbezug</u> ($\chi = -2.598, p = .008, r = -.542; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Ph} = 0.00$) <u>7.3.5. Unterrichtsplanung und -begleitung</u> ($\chi = -2.828, p = .008, r = -.590; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Ph} = 0.00$)	<u>7.1.2. Nötiges Vorwissen</u> ($\chi = -2.646, p = .016, r = -.447; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Bio} = 0.00$) <u>7.3. Wissen über das Verständlichmachen von Inhalten</u> ($\chi = -3.591, p < .001, r = -.607; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Bio} = 2.00$) ^a <u>7.3.2.3. Allgemeine Visualisierungshinweise</u> ($\chi = -2.107, p = .034, r = -.356; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Bio} = 0.00$) <u>7.3.3. Erklärungen</u> ($\chi = -3.581, p < .001, r = -.605; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Bio} = 1.00$)	
TPACK		<u>8.1. Wissen über das Potenzial von Aufgaben mit dem Medium</u> ($\chi = -3.147, p < .001, r = -.532; Mdn_{Ma} = 3.00, Mdn_{Bio} = 2.00$) <u>8.2. Wissen über Schüler*innenkognitionen und Diagnose von Schüler*innenwissen in Verbindung mit dem Medium</u> ($\chi = -2.970, p = .002, r = -.502; Mdn_{Ma} = 0.00, Mdn_{Bio} = 0.00$)	

^a aus mehreren Subkategorien aggregierte Werte

Effektstärke nach Cohen (1988): klein ($r = .1$ bis $.3$), **mittel** ($r = .3$ bis $.5$), **stark** ($r = .5$ und höher)

Unterschied auch bei Kruskal-Wallis-Tests (siehe

Tab. 7