

Eine AR-Erweiterung des EPo-Konzepts zu einfachen Stromkreisen

Saskia Rauber*, Jan-Philipp Burde*, Thomas Wilhelm⁺, Martin Hopf^x, Liza Dopatka^o, Verena Spatz^o, Thomas Schubatzky[#], Claudia Haagen-Schützenhöfer[#], Lana Ivanjek[>]

*AG Didaktik der Physik, Eberhard Karls Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen;

⁺Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt;

^xÖsterreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik, Universität Wien, Porzellangasse 4, 1090 Wien;

^oInstitut für Physik, Physikdidaktik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt;

[#]Institut für Physik, Physikdidaktik, Karl-Franzens-Universität Graz, Universitätsplatz 5, 8010 Graz;

[>]Didaktik der Physik, TU Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden;

saskia.rauber@student.uni-tuebingen.de, jan-philipp.burde@uni-tuebingen.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, martin.hopf@univie.ac.at, liza.dopatka@physik.tu-darmstadt.de, verena.spatz@physik.tu-darmstadt.de, thomas.schubatzky@uni-graz.at, claudia.haagen@uni-graz.at, lana.ivanjek@tu-dresden.de

Kurzfassung

Augmented Reality (AR) im Physikunterricht hat das Potenzial, die Motivation sowie das konzeptionelle Verständnis der Schülerinnen und Schüler zu fördern. Da Physik bei den meisten Lernenden zu den unbeliebten Schulfächern zählt und besonders in der Elektrizitätslehre viele problematische Schülervorstellungen und Verständnisschwierigkeiten auftreten, kann die Nutzung von AR-Anwendungen in diesem Bereich vorteilhaft sein. Eine Vielzahl der Verständnisschwierigkeiten in der E-Lehre sind auf ein fehlendes qualitatives Spannungskonzept zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund wurden zu einer Reihe von Übungsaufgaben der Unterrichtskonzeption „Eine Einführung in die Elektrizitätslehre mit Potential“ (kurz: EPo-Konzept) diverse AR-Modelle von Stromkreisen erstellt. Diese lassen sich unkompliziert mit Hilfe von mobilen Endgeräten über QR-Codes aufrufen und erscheinen anschließend über den Schaltplänen. Da in den AR-Modellen die Spannungsverhältnisse in den Stromkreisen mittels Farbkodierung visualisiert werden, können diese den Schülerinnen und Schülern als Musterlösung dienen. Durch die Darstellung verschiedener Bestandteile des Stromkreises wie Batterie und Lämpchen, kann das AR-Modell den Schülerinnen und Schülern auch dabei helfen, sich zu einem gegebenen Schaltplan einen realen Stromkreis vorzustellen. Im Beitrag wird die AR-Erweiterung des EPo-Konzepts anhand verschiedener 3D-Stromkreismodelle exemplarisch vorgestellt. Außerdem werden ihr Mehrwert sowie ihre Grenzen im Physikunterricht diskutiert.

1. Schülervorstellungen und Verständnisschwierigkeiten in der E-Lehre

Elektrizität und besonders der Begriff des Stroms spielen im Alltag eine große Rolle, sodass viele Schülerinnen und Schüler bereits ein verfestigtes Bild der damit verbundenen Begriffe haben (z. B. „Stromverbrauch“). Häufig sind die aus der Alltagssprache und den Alltagserfahrungen stammenden Schülervorstellungen jedoch aus physikalischer Sicht fehlerhaft, weswegen sie zu Verständnisschwierigkeiten im Physikunterricht führen können (Schecker & Duit, 2018, S. 12).

Weit verbreitet ist z. B. die Stromverbrauchsvorstellung, die auch nach Thematisierung im Unterricht noch häufig als Erklärung herangezogen wird (Shipstone et al., 1988, S. 305; Rhöneck, 1986, S. 10). Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass die Batterie von Schülerinnen und Schülern oftmals als konstante Stromquelle angesehen wird, unabhängig davon, an welchen Stromkreis sie angeschlossen ist (Shipstone et al., 1988, S. 307). Dies kann unter anderem daher

rühren, dass sowohl im Alltag als auch im Unterricht vielfach der Begriff der „Stromquelle“ verwendet wird, der die falsche Vorstellung einer konstanten Stromquelle begünstigt. Es sollte im Unterricht also besser der Begriff „Spannungsquelle“ verwendet werden (Wilhelm & Hopf, 2018, S. 122). Zudem besteht das Problem, dass viele Schülerinnen und Schüler nicht richtig zwischen den Begriffen Stromstärke und Spannung unterscheiden können und dazu tendieren, Spannung als eine Eigenschaft der Stromstärke anzusehen und nicht als eigenständige physikalische Größe (Shipstone et al., 1988, S. 307; Rhöneck, 1986, S. 10). Außerdem fällt es vielen Lernenden schwer, den Unterschied zwischen einer Reihen- und Parallelschaltung zu erkennen, weil sie anstatt mit der Spannung oft mit der geometrischen Struktur argumentieren (Duit, 2017, S. 5). Viele Lernende scheitern daran zu erkennen, dass ein Schaltplan nicht die genaue örtliche Anordnung wiedergibt, sondern lediglich vereinfacht die systematische Anordnung der Bauteile widerspiegelt (McDermott & Shaffer,

1992, S. 999). Auf weitere Schwierigkeiten stoßen Schülerinnen und Schüler, wenn sie zu einem gegebenen Schaltbild einen realen Stromkreis aufbauen sollen und umgekehrt (Wilhelm & Hopf, 2018, S. 130).

Insgesamt kristallisiert sich anhand der gerade vorgestellten Schülervorstellungen heraus, dass Verständnisschwierigkeiten durch ein fehlendes qualitatives und eigenständiges Spannungskonzept sowie einen dominierenden Strombegriff begünstigt werden, wie auch Rhöneck darlegt:

Bei vielen Schülern entwickelt sich während des Unterrichts aus einer einfachen Verbrauchsvorstellung eine Vorstellung mit einem übermächtigen Strombegriff, der lokale und sequentielle Argumentationen mit einschließt und nicht durch einen unabhängigen Spannungsbegriff ergänzt wird. (Rhöneck, 1986, S. 13)

Die qualitative Auseinandersetzung mit dem Spannungsbegriff als Differenzgröße kommt jedoch in den meisten Schulbüchern zu kurz (Burde & Wilhelm, 2020, S. 3). Der Fokus in traditionellen Lehransätzen liegt auf dem Stromstärkebegriff, wodurch ein tiefergreifendes Verständnis zwischen den Zusammenhängen der drei Grundgrößen Spannung, Stromstärke und Widerstand eines elektrischen Stromkreises erschwert wird (Rhöneck, 1986, S. 10). Wie die vorherrschenden Schülervorstellungen und daraus resultierenden Verständnisschwierigkeiten dahingegen gezeigt haben, spielt ein qualitatives Verständnis des Spannungsbegriffs eine entscheidende Rolle für ein grundlegendes Verständnis von Stromkreisen und allgemein der E-Lehre.

2. Die grundlegenden Ideen des EPo-Konzepts

Die Unterrichtskonzeption „Eine Einführung in die Elektrizitätslehre mit Potenzial“ (Burde, 2018b; kurz: EPo) wurde mit dem Ziel entwickelt, den Schülerinnen und Schülern im Anfangsunterricht des Schulfachs Physik ein qualitatives, konzeptionelles Verständnis von Stromkreisen zu vermitteln (Burde & Wilhelm, 2020). Dabei liegt der Fokus vor allem auf der Förderung eines qualitativen Spannungskonzepts und der daraus folgenden Bedeutung für den elektrischen Strom. Konkret wird die elektrische Spannung in Analogie zum Luftdruckunterschied als „elektrischer Druckunterschied“ eingeführt. Dieser Ansatz beruht auf dem US-amerikanischen CASTLE-Curriculum (kurz für „Capacitor-Aided System for Teaching and Learning Electricity“) von Steinberg und Wainwright (1993).

Um den Druckunterschied in Schaltplänen zu visualisieren, wird der „elektrische Druck“ mithilfe einer einfachen und intuitiv zugänglichen Farbkodierung anschaulich gemacht (siehe Abb. 1). Das Farbschema basiert auf der alltäglichen Konvention, wie es zum Beispiel bei Wasserhähnen oder Wetterkarten verwendet wird. Denn rot stellt im Alltag oft einen hohen

Wert dar und blau einen niedrigen. Das bedeutet, dass der „hohe elektrische Druck“ rot, der „niedrige elektrische Druck“ blau und der „Normaldruck“ gelb eingefärbt wird (siehe Abb. 1).

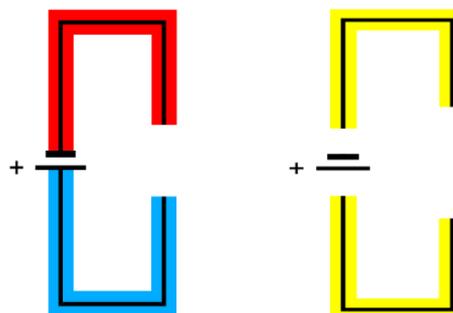


Abb. 1: Farbkodierung des elektrischen Drucks in Schaltplänen. Rot steht für einen „hohen elektrischen Druck“, blau für einen „niedrigen elektrischen Druck“ und gelb für einen „normalen elektrischen Druck“ (Burde, 2018b, S. 7).

Eine empirische Untersuchung mit Schülerinnen und Schülern im Anfangsunterricht hat ergeben, dass ein Unterrichtskonzept auf Basis dieser Ideen zu einem signifikant besseren Verständnis führt ($d = .94$) (Burde, 2018a). Des Weiteren hat sich gezeigt, dass typische Schülervorstellungen weniger stark ausgeprägt sind und vor allem ein besseres Verständnis des Differenzcharakters der elektrischen Spannung erreicht werden konnte (Burde, 2018a).

Insgesamt gibt es im EPo-Konzept viele Übungsaufgaben, die auf der Farbkodierung der unterschiedlichen Potenziale aufbauen (siehe z. B. Burde, 2018b, S. 27). Unterläuft den Lernenden bei der Farbkodierung jedoch ein Fehler, kann die restliche Aufgabe leicht falsch beantwortet werden. Hier kann eine Zwischenlösung, welche die richtige Farbkodierung anzeigt, hilfreich sein, um diesen Fehlern vorzubeugen und autonomes, differenziertes Lernen zu fördern. In Anbetracht dessen und der Tatsache, dass das Fach Physik zu den unbeliebtesten Schulfächern zählt (Muckenfuß, 2006, S. 76), bietet es sich an, das Unterrichtskonzept mit Augmented Reality (kurz: AR) zu erweitern, um das Interesse der Lernenden einzufangen.

3. Chancen von Augmented Reality im Physikunterricht

Unter „Augmented Reality“ (dt. erweiterte Realität) werden alle Anwendungen verstanden, durch welche die reale Umgebung mithilfe von virtuellen Objekten erweitert wird (Milgram & Kishino, 1994, S. 1326). Dies erfolgt zumeist, indem die Kamera eines mobilen Endgeräts auf die zu augmentierende Stelle gerichtet wird und die augmentierten Objekte dann auf dem Bildschirm des Geräts erscheinen. Wird das mobile Endgerät bewegt, bleiben die virtuellen Objekte auf ihrer zugewiesenen Position und die neu gestaltete Umgebung kann aus einem anderen Blickwinkel betrachtet werden (Teichrew & Erb, 2020, S. 2). Somit ist AR von Virtual Reality (VR) abzugrenzen, bei

welcher die beobachtende Person komplett in eine virtuelle Welt eintaucht und mit ihr interagieren kann; das heißt, es gibt in einer VR-Umgebung keine realen Elemente mehr (ebd.).

Indem bei AR (im Gegensatz zu VR) die reale Umgebung mit virtuellen Elementen erweitert wird, können zum Beispiel nicht-beobachtbare Inhalte zusätzlich sichtbar gemacht werden (Wu, Lee, Chang & Liang, 2013). So kann ein Mehrwert einer AR-Erweiterung im Physikunterricht sein, dass Experimente mit zusätzlichen Informationen und Darstellungen überlagert und verknüpft werden können, die nicht sichtbar, aber wichtig für das Verständnis sind. Die Möglichkeit, Modellvorstellungen zu visualisieren, unterstützt die Schülerinnen und Schüler im Denken in Form von Analogien (Kauertz, Löffler & Fischer, 2015, S. 472). Ein weiterer möglicher Mehrwert von AR ist, dass AR-Anwendungen in Form von (gestuften) Lernhilfen zur inneren Differenzierung im Unterricht eingesetzt werden können (ebd.), da zum Beispiel Musterlösungen einer Übungsaufgabe virtuell eingeblendet werden können und es den Lernenden so ermöglicht wird, in ihrem eigenen Tempo zu arbeiten. Auch in Bezug auf das Autonomieerleben können AR-Anwendungen förderlich wirken, da die Lernenden selbst entscheiden können, wann und in welchem Umfang sie die AR-Anwendung nutzen (Spanhel, 2020, S. 65).

Jedoch kann die Implementierung von AR auch negative Aspekte mit sich bringen. Zum Beispiel können Anwendungsprobleme auftauchen, wenn die Anwendungsoberflächen nicht intuitiv gestaltet sind oder bei den Lernenden digitale Kompetenzen fehlen (Schmid et al., 2018, S. 225). In Hinblick auf die Cognitive load theory nach Chandler und Sweller (1991) kann es zudem passieren, dass die Schülerinnen und Schüler mit dem AR-Angebot überfordert sind oder aufgrund von Flüchtigkeit und einer Vielzahl von Darstellungen wichtige Informationen nicht wahrnehmen (Girwidz & Hoyer, 2021, S. 20).

Auch wenn es mittlerweile einige Studien zur Frage gibt, inwiefern AR den Unterricht bereichern kann, ist die Befundlage insgesamt unklar. Dies liegt unter anderem daran, dass die Studien widersprüchliche Ergebnisse aufweisen (vgl. z. B. Radu, 2014; Thees et al., 2020). In einer Meta-Studie analysierte Radu (2014) verschiedene Untersuchungen zu AR, um herauszufinden, inwiefern sich Unterricht mit AR von Unterricht ohne AR unterscheidet. Als Vorteile von AR stellten sich in dieser Meta-Studie vor allem ein erhöhtes konzeptionelles, inhaltliches und räumliches Verständnis, eine vertiefte Speicherung im Langzeitgedächtnis, verbesserte Zusammenarbeit unter den Lernenden sowie eine erhöhte Motivation im Vergleich zu anderen Medien wie Büchern, Videos oder PC-Desktop-Anwendungen heraus (ebd., S. 1534-1536). Als negative Effekte von AR zeigte sich unter anderem die Gefahr, dass die Lernenden sich zu sehr auf die AR-Anwendung konzentrieren und deswegen

andere wichtige Aspekte der Lerneinheit nicht wahrnehmen oder nicht in der Lage sind, Gruppenarbeiten auszuführen (ebd., S. 1356). Auch wenn viele Schülerinnen und Schüler die AR-Anwendungen interessanter finden als andere Anwendungen, fällt ihnen die Bedienung oft schwerer als bei anderen Medien (ebd., S. 1537).

In einer weiteren Studie zu AR im wissenschaftlichen Unterricht verglichen Sotiriou und Bogner (2008) die Lernleistung und Motivation von Schülerinnen und Schülern, welche entweder mit oder ohne AR-Unterrichtskonzept unterrichtet wurden. Ein Ergebnis war, dass das Wissen der Gruppe mit AR-Anwendungen signifikant besser war als das der Kontrollgruppe und die AR-Anwendungen vor allem dabei halfen, Fehlvorstellungen zu korrigieren (ebd., S. 119). Ein weiteres wichtiges Ergebnis bestand darin, dass die Lernenden wegen der innovativen Technik und den Visualisierungen mehr Interesse und Motivation in Bezug auf das Lernthema hatten, was zum Beispiel dadurch deutlich wurde, dass in der Experimentaltgruppe doppelt so viele Lernende Fragen stellten als in der Kontrollgruppe (ebd.). Jedoch ist zu betonen, dass die Interessens- und Motivationssteigerung auch oftmals durch den „Neuheitseffekt“ ausgelöst wird und deshalb schnell wieder abnehmen kann (Hillmayr, Reinhold, Ziernwald & Reiss, 2017, S. 19).

Bei der genaueren Betrachtung der Studien zu AR im Physikunterricht fällt auf, dass sich diese überwiegend auf AR-Anwendungen beziehen, welche über Experimente gelegt werden, um zum Beispiel unsichtbare Vorgänge und Zusatzinformationen visualisieren und forschendes Lernen unterstützen zu können (vgl. z. B. Thees et al., 2020; Altmeyer et al., 2020; Kapp et al., 2020). Vergleichbare Studien für AR-Anwendungen, die vorwiegend als Musterlösung dienen, konnten nicht gefunden werden.

Im Ganzen können aufgrund der unterschiedlichen, sich teils widersprechenden Ergebnisse sowie einem Mangel an Untersuchungen speziell für AR als Musterlösung noch keine endgültigen Rückschlüsse für die hier vorgestellte AR-Erweiterung getroffen werden. Es sei hervorgehoben, dass zusätzlich zu den Studienergebnissen zu beachten ist, dass der Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler nicht allein von der AR-Anwendung abhängt, sondern in hohem Maße auch davon, wie die AR-Anwendung gestaltet und didaktisch in den Unterricht eingebettet ist (Wu et al., 2013; Garzón, Kinshuk, Baldiris, Gutiérrez & Pavón, 2020). Dies ist auch dahingehend wichtig, als dass digitale Medien nicht zu ihrem Selbstzweck, sondern didaktisch begründet in den Unterricht integriert werden müssen (Lachner, Scheiter & Stürmer, 2020, S. 69).

4. Die AR-Erweiterung des EPo-Konzepts

Wie beschrieben, zeigen empirische Studien, dass der Einsatz von AR-Anwendungen im Unterricht das Interesse und die Motivation der Schülerinnen und

Schüler steigern kann. Die Idee der AR-Erweiterung des EPo-Konzepts ist es, für die Übungsaufgaben, welche auf Farbkodierung der Schaltpläne basieren, Musterlösungen mittels AR bereitzustellen. Dazu werden die Schaltpläne mithilfe der 3DQR-Software (3DQR GmbH, 2021) um QR-Codes erweitert, die mit einem mobilen Endgerät abgescannt werden können, wodurch die Musterlösungen in Form von 3D-Modellen der Schaltpläne sichtbar werden (siehe Abb. 2).

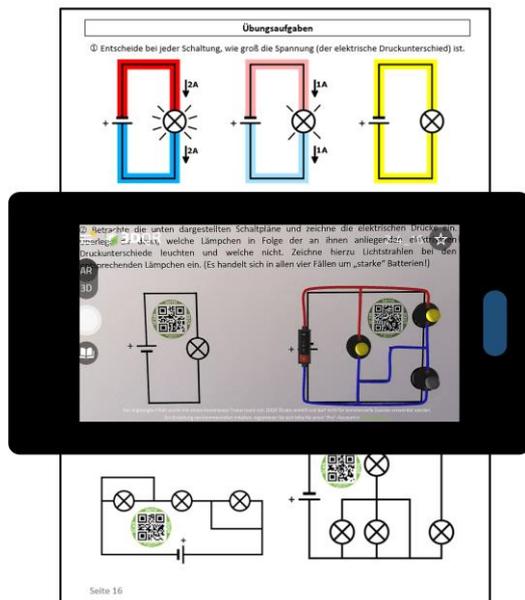


Abb. 2: Visualisierung der AR-Musterlösung mithilfe eines Smartphones, das über die Schaltpläne der Aufgaben gehalten wird.

Für die schulgerechte Entwicklung der 3D-Stromkreismodelle für die AR-Erweiterung wurde folgende Zielstellung definiert: Die 3D-Modelle sollen als leicht zugängliche Musterlösung für Farbkodierungsaufgaben der Schaltpläne dienen. Deshalb soll die Handhabung möglichst einfach und intuitiv sein. Außerdem sollen die Lernenden leicht erkennen können,

dass der 3D-Stromkreis den Aufbau des Schaltplans widerspiegelt, weshalb der 3D-Stromkreis mittels AR auf dem Smartphone nahezu deckungsgleich über der Schaltskizze platziert werden soll. Die Schaltsymbole sollen durch 3D-Darstellungen als entsprechende Bauteile visualisiert werden, um den Lernenden die Verknüpfung zwischen Schaltplan und tatsächlichem Stromkreis zu erleichtern. Für die Erstellung der 3D-Modelle wurde die kostenlose Software Blender genutzt (Blender Foundation, 2002).

Die AR-Musterlösung stellt ferner eine Möglichkeit zur inneren Differenzierung dar. Auch wenn es sich nicht um eine mehrstufige Lösung handelt, bekommen die Lernenden die Möglichkeit, die Aufgaben in ihrem individuellen Tempo zu bearbeiten, da sie nicht mehr auf eine Lösungsabgleichung im Plenum angewiesen sind und die Lösungen permanent zur Verfügung haben. Außerdem kann die AR-Anwendung als Zwischenlösung bei Aufgaben herangezogen werden, bei welchen weiterführende Aufgabenteile auf der Farbkodierung des Schaltplans aufbauen (siehe Abb. 3). Somit können diese Aufgaben auch gut zu Hause bearbeitet werden. Entsprechend der Selbstbestimmungstheorie nach Deci & Ryan (1985) kann durch die AR-Erweiterung so das Kompetenz- und Autonomieerleben der Schülerinnen und Schüler gefördert werden.

Die AR-Erweiterung soll zu einem besseren Verständnis des „elektrischen Druckunterschieds“ bzw. des Spannungsbegriffs beitragen. Hierzu greift die AR-Erweiterung die Farbkodierung des EPo-Konzepts auf, um den in Stromkreisen bzw. Schaltplänen nicht-beobachtbaren „elektrischen Druckunterschied“ bzw. Potenzialunterschied zu visualisieren. Dadurch, dass sich die Lernenden eigenständig mit den in den jeweiligen Stromkreisen herrschenden Potenzialdifferenzen auseinandersetzen können, kann es zu einem besseren Verständnis des Spannungskonzepts kommen. Außerdem können die 3D-Modelle der Stromkreise dabei helfen, ein besseres Verständ-

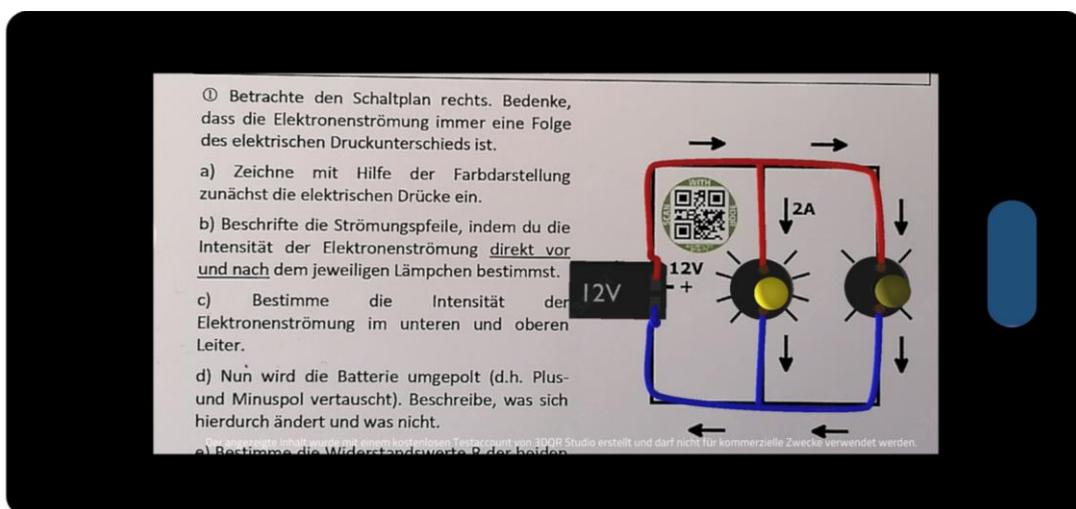


Abb. 3: AR-Erweiterung als Lösung zur Teilaufgabe a) und Grundlage für die auf der Farbkodierung aufbauenden Teilaufgaben b) und c).

nis der Schaltpläne zu erreichen. Indem mittels AR das 3D-Stromkreismodell direkt über den Schaltplan gelegt wird, wird der Zusammenhang zwischen Schaltplan, Schaltsymbolen und den ihnen entsprechenden Bauteilen im Stromkreis visuell verdeutlicht.

Somit sind neben einer Motivations- und Interessenssteigerung folgende Vorteile in Hinblick auf die AR-Erweiterung denkbar: Eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Luftdruckanalogie sowie der Bauteile des Stromkreises, ein erhöhtes inhaltliches und räumliches Verständnis in Bezug auf die Stromkreise und entsprechenden Schaltpläne und eine geringere kognitive Belastung, da die 3D-Modelle zeitlich und räumlich mit den Schaltplänen verknüpft sind.

5. Grenzen der AR-Erweiterung

Ein Modell, welches als Anhaltspunkt zur Einordnung eines digitalen Tools dienen kann, ist das SAMR-Modell nach Puentedura (2006). Dieses unterteilt den Einsatz digitaler Medien in vier hierarchisch aufeinander aufbauende Stufen: Substitution (dt. Ersetzung), Augmentation (dt. Erweiterung), Modification (dt. Änderung) und Redefinition (dt. Neudefinition). Substitution bedeutet, dass das digitale Medium das analoge Medium ersetzt, aber keinen funktionalen Mehrwert hat. Eine Stufe darüber beschreibt Augmentation ein digitales Medium, welches das analoge Medium ersetzt und zugleich einen funktionalen Mehrwert hat. Bei der Modification ermöglicht die digitale Anwendung eine bedeutsame Umgestaltung bereits vorhandener Aufgaben und Redefinition erlaubt die Gestaltung einer neuen Aufgabe, welche ohne digitale Medien in dieser Form nicht umzusetzen wäre. Im Folgenden werden die Grenzen der AR-Erweiterung unter Berücksichtigung dieses Modells diskutiert.

Zunächst sei bedacht, dass bei der AR-Erweiterung des EPo-Konzepts lediglich 3D-Modelle als Musterlösung per AR integriert wurden und diese keine weitere Interaktion zulassen. So können zum Beispiel keine Bauteile ausgetauscht oder verschoben werden, um herauszufinden, inwiefern sich dies auf die Größen Spannung, Stromstärke oder Widerstand im Stromkreis auswirken würde. Eine weitere Grenze der AR-Anwendung ist, dass die Musterlösungen in Form farbiger 3D-Modelle von Stromkreisen nur einen geringen Mehrwert im Vergleich zur farbigen 2D-Darstellung z. B. in Schulbüchern bieten. Somit ist die hier vorgestellte AR-Musterlösung der untersten Stufe des SAMR-Modells, der Substitution, zuzuordnen, da es sich lediglich um eine Ersetzung des analogen Mediums in ein digitales Medium handelt, ohne einen funktionalen Mehrwert mit sich zu bringen. Ein funktionaler Mehrwert zeigt sich erst in der Visualisierung des Schaltplans in Form der tatsächlichen dreidimensionalen Stromkreise, welche zu einem besseren Verständnis von Schaltplänen und Schaltsymbolen führen kann. Wird dieser Aspekt mitberücksichtigt, rückt die AR-Erweiterung auf die Stufe der Augmentation. Es stellt sich auch die Frage,

inwiefern die Schülerinnen und Schüler sich mit dem 3D-Modell auseinandersetzen und Vergleiche mit dem Schaltplan anstellen. Da die AR-Erweiterung primär als Musterlösung dient, kann es passieren, dass die Lernenden sich lediglich auf die Farbmarkierung der Kabel konzentrieren und alles andere außer Acht lassen. Des Weiteren könnte hinsichtlich der Lernschwierigkeit, dass viele Schülerinnen und Schüler denken, Schaltpläne seien eine Eins-zu-Eins-Abbildung eines Stromkreises, kritisiert werden, dass die exakte Überlagerung der 3D-Modelle auf den Schaltplänen dieses Denken verstärken kann.

Zudem können technische Schwierigkeiten auftreten, u. a. da jedes 3D-Modell ca. 20 MB benötigt, die zunächst heruntergeladen werden müssen. Eine stabile Internetverbindung – am besten per WLAN – ist also Voraussetzung für die Nutzung der AR-Anwendung. Bei schlechter Internetverbindung erhöht sich die Ladezeit und kann somit für aufkommendes Desinteresse sorgen. Außerdem ist die 3DQR-App nicht mit älteren Smartphone-Modellen kompatibel. In Anbetracht dessen, dass die meisten, aber nicht alle Schülerinnen und Schüler zu Hause ein geeignetes mobiles Endgerät und eine stabile Internetverbindung haben (JIM-Studie, 2020, S. 20; JIM-Studie, 2021, S. 9), sollte beim Einsatz der AR-Erweiterung vonseiten der Lehrkraft sichergestellt werden, allen Lernenden ausreichend Möglichkeiten zur Nutzung der AR-Anwendung zur Verfügung zu stellen. In Hinblick auf technische Grenzen fällt zudem bei genauer Betrachtung der 3D-Modelle durch das Smartphone auf, dass in der App zusätzlich ein Schatten über die Modelle gelegt wird (vgl. z. B. Abb. 2 und 3). Dies ist insofern problematisch, als dass es bei den Lämpchen so scheint, als würden sie von außen beleuchtet werden und nicht von selbst leuchten. Hierbei handelt es sich um eine technische Limitation der 3DQR-App, über die sich Lehrkräfte vor Einsatz des Konzepts im Unterricht genauso bewusst sein sollten, wie über die anderen hier aufgeführten Grenzen der AR-Erweiterung des EPo-Konzepts.

6. Ausblick

Die hier vorgestellte Arbeit stellt einen weiteren Schritt der Erweiterung des EPo-Konzepts um digitale Formate dar (vgl. Burde, Weatherby & Wilhelm, 2022). Insgesamt zeichnet sich ab, dass eine Einordnung der vorgenommenen AR-Erweiterung hinsichtlich ihres Mehrwerts für den Physikunterricht nicht abschließend möglich ist. Bisherige Forschungsergebnisse sind noch zu widersprüchlich und passen nicht direkt zur hier vorgestellten AR-Anwendung. Die heuristische Einordnung der AR-Erweiterung in das SAMR-Modell hat gezeigt, dass die erstellten 3D-Modelle lediglich der Stufe Substitution bzw. Augmentation zuzuordnen sind. Vor dem Hintergrund, dass der Einsatz digitaler Medien im Unterricht mit einem didaktischen Mehrwert einhergehen sollte, kann dies kritisch gesehen werden. Dementsprechend bietet sich eine Untersuchung der Wirksamkeit der

AR-Erweiterung auf die Motivation der Schülerinnen und Schüler sowie ihrem Verständnis von Schaltplänen und Schaltsymbolen an. Interessierte Lehrkräfte können die AR-Erweiterung des EPO-Konzepts kostenfrei von der Internetseite www.einfache-elehre.de herunterladen.

7. Literatur

- 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 Education Technology*, 51(3), 611-628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Blender Foundation (2002). Blender (Version 2.93.1) [3D-Grafiksoftware]. Download unter: <https://www.blender.org/download/> (Stand: 3/22)
- Burde, J.-P. (2018a). Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. *Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 259*, Berlin: Logos-Verlag. <http://doi.org/10.30819/4726>
- Burde, J.-P. (2018b). *Eine Einführung in die Elektrizitätslehre mit Potenzial*. ISBN: 978-3-00-061201-5. Online verfügbar unter: <https://www.einfache-elehre.de/epo.php> (Stand: 3/22)
- Burde, J.-P., Weatherby, T., & Wilhelm, T. (2022). Putting Potential at the Core of Teaching Electric Circuits. *The Physics Teacher* 60, Nr. 5, 2022, S. 340-343 (<https://doi.org/10.1119/5.0046298>)
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2020). Teaching electric circuits with a focus on potential differences. *Physical review physics education research*, 16. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020153>
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293-332. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York, NY: Plenum.
- Duit, R. (2017). Elektrizitätslehre aus Schülersicht. *NWUP: Elektrische Stromkreise*, 157, 2-7.
- Garzón, J., Kinshuk, Baldiris, S., Gutiérrez, J., & Pavón, J. (2020). How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educational Research Review*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>
- Girwidz, R., & Hoyer, C. (2021). Didaktische Aspekte zum Einsatz digitaler Medien – Leitlinien zum Lehren mit Multimedia. In J. Meßinger-Koppelt & J. Maxton-Küchenmeister (Hrsg.), *Naturwissenschaften Digital. Band 1* (S. 6-23). Köln: Buch- und Offsetdruckerei Häuser KG.
- Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L., & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe. Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Münster: Waxmann Verlag GmbH.
- Kapp, S., Thees, M., Beil, F., Weatherby, T., Burde, J.-P., Wilhelm, T., & Kuhn, J. (2020). Using augmented reality in an inquiry-based physics laboratory course. In H. C. Lane, S. Zvacek, J. Uhomoihi (Hrsg.), *Computer Supported Education. CSEDU 2020. Communications in Computer and Information Science*, 1473, (S. 177-198). Schweiz: Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86439-2_10
- Kauertz, A., Löffler, P., & Fischer H. E. (2015). Physikaufgaben. In E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik*, (S. 451-476). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_14
- Lachner, A., Scheiter, K., & Stürmer, K. (2020). Digitalisierung und Lernen mit digitalen Medien als Gegenstand der Lehrerinnen- und Lehrerbildung. In C. Cramer, J. König, M. Rothland, S. Blömeke (Hrsg.), *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, (S. 67-74). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994-1013.
- Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest (2020). *JIM-Studie 2020. Jugend, Information, Medien*. Online verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2020/> (Stand: 3/22)
- Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest (2021). *JIM-Studie 2021. Jugend, Information, Medien*. Online verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2021/> (Stand: 3/22)
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 12(12), 1321-1329.
- Muckenfuß, H. (2006). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen.
- Puentedura, R. R. (2006). *Transformation, Technology, and Education* [Screencast des Vortrags vom 18.08.2006 des Workshops *Strengthening Your District Trough Technology* der Maine School Superintendents Association]. Online verfügbar unter: <http://hippasus.com/resources/tte/> (Stand: 3/22)
- Radu, I. (2014). Augmented reality in education: A meta-review and cross-media analysis. *Pers*

- Ubiquit Comput* 18, 1533-1543.
<https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>
- Rhöneck, C. v. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie*, 34(13), 10-14.
- Schecker H., & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physiklernen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & r. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, (S. 1-21). Berlin: Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Schmid, A. M.; Wetzel, R.; & Brovelli, D. (2018). Augmented Reality in der Lehrerinnen- und Lehrerbildung beim Arbeiten mit Modellen in den Naturwissenschaften. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 36(2), 223-230.
<https://doi.org/10.25656/01:17098>
- Shipstone, D. M., Rhöneck, C. v., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J.-J., Johsua S., & Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10(3), 303-316.
<https://doi.org/10.1080/0950069880100306>
- Sotiriou, S., & Bogner, F. X. (2008). Visualizing the Invisible: Augmented Reality as an Innovative Science Education Scheme. *Advanced Science Letters*, 1, 114-122.
<https://doi.org/10.1166/asl.2008.012>
- Spanhel, D. (2020). Selbstgesteuertes Lernen ist Voraussetzung für Medienkompetenz. *bildung+schuledigital: Flipped School – Erste Hilfe dank Digitalisierung*, 1, 64-65.
- Steinberg, M. S., & Wainwright, C. L. (1993): Using models to teach electricity – The CASTLE Project. *The Physics Teacher* 31(6), 353–357.
- Teichrew, A., & Erb, R. (2020). How augmented reality enhances typical classroom experiments: examples from mechanics, electricity and optics. *Physics Education* 55(6), 1-7.
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/abb5b9>
- 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, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & r. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, (S. 116-138). Berlin: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Wu, H., Lee, S. W. Y., Chang, H. Y., & Liang, J. C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers and Education*, 62, 41–49. 3DQR GmbH (2021).
- 3DQR Studio [Software zur Erstellung und Verwaltung von AR-Szenen]. Online verfügbar unter: <https://studio.3dqr.de/#/auth/login> (Stand: 3/22)
- 3DQR GmbH (2021). 3DQR 2.0 [Software für mobile Anwendungen für Android und iOS].