

Augmented Reality-Experimente mit GeoGebra

Albert Teichrew*, Roger Erb*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main
teichrew@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Mit der Geometrie-Software GeoGebra lassen sich 3D-Objekte zur Visualisierung abstrakter Ideen dynamisch modellieren. Mit der App GeoGebra 3D Grafikrechner können die Modelle auch auf einem Smartphone oder Tablet aufgerufen und bearbeitet werden. Darüber hinaus ist es möglich, sie mit der Augmented Reality-Funktion auf beliebige Strukturen einzublenden. Bei Veränderung der Position des Mobilgeräts bleiben die virtuellen Objekte fest an der zugewiesenen Stelle des von der Kamera eingefangenen Bildes. Der Modellinhalt lässt sich allerdings dynamisch an reale Gegebenheiten anpassen. Auf diese Weise wird eine leicht umsetzbare Erweiterung realer Experimente mit idealen Darstellungen ermöglicht, die als Augmented Reality-Experimente bezeichnet werden. Dabei erweitern virtuelle Bestandteile reale Strukturen dort, wo nicht beobachtbare Elemente zum Verständnis des Experiments beitragen und den Vergleich von Modell und Realität erleichtern. Der Einsatz von Augmented Reality-Experimenten zum Lehren und Lernen der Physik wird anhand von Beispielen aus Mechanik, Elektrizitätslehre und Optik erläutert.

1. Digitale Medien im Physikunterricht

Die Physikdidaktik beschäftigt sich schon lange mit dem Unterrichtseinsatz von Multimedia, sog. Neuen Medien oder *digitalen* Medien, wie sie jetzt im Zusammenhang mit der Digitalisierung ebenfalls genannt werden.

1.1. Computereinsatz

Mit dem Schlagwort *Computereinsatz* werden solche Einsatzszenarien verbunden wie Aufnahme von Bewegungen mit anschließender Analyse am PC (Videoanalyse; Suleder, 2020), Berechnung einer Bewegung durch Eingabe der Kräfte mit anschließender Diagrammausgabe (mathematische Modellbildung; Weber & Wilhelm, 2020) sowie schematische Darstellung realer Experimente mit Eingabe von Werten und Ausgabe simulierter Ergebnisse (Simulationen; de Jong, 2006). Aus einer mediendidaktischen Perspektive liegen die Vorzüge der Darstellung von physikbezogenen Inhalten auf einem Bildschirm in der Möglichkeit zur Wiederholung von Prozessen mit Anpassung der Geschwindigkeit an den Betrachter, Berechnung und Einblendung von Zusatzinformationen zur Visualisierung von abstrakten Konzepten sowie Exploration von komplexen Systemen, die für diesen Zweck *digitalisiert* worden sind.

Wie diverse Studien gezeigt haben, wurden und werden die Möglichkeiten jedoch aus einer Reihe von Gründen nicht breitflächig im Unterricht ausgenutzt (Pietzner, 2009; Schmid, Goertz, Behrens & Bertelsmann Stiftung, 2017). Das liegt zum einen an der Bekanntheit der Unterrichtskonzepte und der verwendeten Software. Die Verbreitung der Ideen geschieht in der Regel auf freiwilliger Basis über die

Teilnahme an Fortbildungen und den Bezug von entsprechenden Unterrichtszeitschriften. Zum anderen ist eine gewisse Zeit und Motivation zum Selbststudium nötig, da der Einsatz digitaler Medien gerade zu Beginn mit einem technischen und organisatorischen Mehraufwand verbunden ist. Nicht zuletzt machen fehlende Lizenzen oder veraltete Hardware, die allen Lernenden nur in PC-Räumen oder mithilfe von vereinzelt Laptopwägen zur Verfügung gestellt werden kann, das eigenständige Lernen am Computer zu einer Ausnahme vom Regelunterricht.

1.2. Mobile Endgeräte

Die allgegenwärtige Nutzung von Smartphones und Tablets im Alltag und Beruf eröffnet für den Einsatz digitaler Medien im Unterricht neue Perspektiven. Die Beschaffung ist kostengünstig und unter Umständen bietet sich auch die Nutzung privater Geräte an. Die Bauweise macht eine flexible Verwendung direkt im Klassen- oder Fachraum möglich. Zudem ist die Bedienung verschiedener Apps durch einheitliche Designelemente und Steuerungsgesten intuitiv geworden. Bei bestehender Internetverbindung ist das Herunterladen von speziellen Apps für den Physikunterricht oder Streamen, Teilen und Kommentieren von Unterrichtsmaterialien genauso möglich, wie es in der Unterhaltungsbranche üblich ist. Nicht zuletzt besteht im inklusiven Unterricht die Möglichkeit mit Barrieren umzugehen.

Darüber hinaus eignen sich viele eingebaute Funktionen für einen Einsatz im Rahmen des Physikunterrichts. Während des Experimentierens können Smartphones und Tablets als Anzeige- und Schreibgeräte verwendet werden, um Anleitungen zu befolgen und Beobachtungen, Messwerte oder Probleme

aufzuschreiben. Mithilfe von Foto- oder Videoaufnahmen können Tafelbilder übernommen oder Experimente fotografiert bzw. gefilmt werden. Die zuvor angesprochene Videoanalyse lässt sich damit in einem Gerät bewerkstelligen. Zudem ergeben sich durch die eingebauten Sensoren interessante Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht. Mit speziellen Apps wie phyphox können verschiedene Größen nicht nur gemessen, sondern auch dargestellt, ausgewertet und gespeichert werden (Staacks, Hütz, Heinke & Stampfer, 2018).

1.3. Effektive Einsatzszenarien

Neben den von Shulman (1987) formulierten drei Wissensarten für Lehrkräfte (allgemeindidaktisches Wissen, fachliches Wissen und fachdidaktisches Wissen) spielt im Zuge dieser Entwicklungen das Wissen rund um digitale Medien eine immer größere Rolle. Nach Mishra und Koehler (2006) gehört dazu nicht nur das Wissen für einen erfolgreichen Umgang mit Hard- und Software, sondern auch das Wissen rund um einen sinnvollen Einsatz von Hard- und Software im Unterricht. Hinzu kommt das Wissen über digitale Medien, die speziell für den jeweiligen Fachunterricht geeignet sind. Das Wissen über effektive Einsatzszenarien, die ein Lernen von Fachinhalten mit digitalen Medien ermöglichen, verbindet und erweitert alle zuvor genannten Wissensarten (TPACK-Modell).

Anzeichen darüber, welche Einsatzszenarien digitaler Medien im Unterricht besonders lernwirksam sind und welche nicht, finden sich nach Zierer (2018) in den von Hattie, Beywl und Zierer (2013) analysierten Faktoren zur Digitalisierung. Hohe Effektstärken werden von den Autoren erst dann erwartet, wenn durch den Einsatz digitaler Medien eine tiefgreifende Transformation der Lernaktivitäten stattgefunden hat. Das ist genau dann nicht der Fall, wenn im Zuge der Digitalisierung digitale Medien bloß als Ersatz für analoge Medien (mit oder ohne funktionale Verbesserung) herangezogen werden. Solche Einsatzszenarien werden in den untersten zwei Ebenen im SAMR-Modell nach Puentedura (2006) beschreiben. Auf den oberen Ebenen wird von einer Neugestaltung oder gar der Erzeugung völlig neuartiger Lernaktivitäten gesprochen. Wie eine Transformation der Lernaktivitäten im Physikunterricht aussehen kann, wird im Folgenden am Beispiel des Einsatzes von Geometrie-Software und Augmented Reality (kurz AR, engl. erweiterte Realität) geschildert.

1.4. Dynamische Geometrie-Software

Geometrische Konstruktionen bilden nicht nur den Kern der geometrischen Optik, sondern spielen auch in anderen Bereichen der Physik als Werkzeug der Visualisierung naturwissenschaftlicher Ideen und Konzepte (Modelle) eine Rolle. Die Besonderheit einer Dynamischen Geometrie-Software (DGS) wie GeoGebra (*geogebra.org*) oder Cinderella (*cinderella.de*) ist, dass sich Veränderungen an einem Objekt

auch auf alle verknüpften Objekte auswirken bzw. über variable Parameter die gesamte Konstruktion beeinflusst werden kann (dynamische Modelle). Obwohl die Dynamik eine nicht zu vernachlässigende funktionale Verbesserung ist, stellt die Demonstration eines Modells bloß einen Ersatz für das analoge Medium Tafel oder Schulbuch dar.

Die eigenständige Bearbeitung oder Erstellung eines dynamischen Modells durch Lernende (virtuelles Experimentieren; Erb, 2016), mit dem Ziel überprüfbarer Aussagen zu gewinnen, ist bereits eine Neugestaltung der üblichen Phase der Hypothesenfindung (Teichrew & Erb, 2018). Für das im Anschluss real durchgeführte Experiment gibt es ebenso verschiedene Möglichkeiten der Transformation der Lernaktivitäten mithilfe digitaler Medien (Laumann, Wichtrup & Friege, 2019). Eine Art der Digitalisierung von Experimenten wird mithilfe von AR erreicht.

1.5. Augmented Reality

Als AR wird die Ergänzung der realen Umgebung mit virtuellen Objekten bezeichnet. Dafür wird entweder eine Kameraaufnahme oder das Sichtfenster einer Brille in Echtzeit überlagert. Entscheidend ist, dass bei Veränderung der Position des mobilen Geräts oder der Brille die virtuellen Objekte an der zugewiesenen Stelle bleiben, sodass ihre Anwesenheit im Raum natürlich erscheint (Carmigniani & Furth, 2011). Reale Situationen werden dadurch um virtuelle Informationen erweitert, wodurch abstrakte Konzepte einen erkennbaren Alltagsbezug erhalten und leichter verständlich werden (Bloxham, 2014). Lernaktivitäten, die mithilfe einer solchen Technologie realisiert werden, wären ohne den Einsatz digitaler Medien in der Form nicht möglich und haben bei entsprechender Einbindung in den Unterricht das Potential, große Effekte auf das Lernen zu erzielen.

2. Augmented Reality mit GeoGebra

Mit einem Smartphone oder Tablet lassen sich die in GeoGebra erstellten Modelle mit der App GeoGebra 3D Grafikrechner aufrufen und ohne spezielle Marker auf jede mit der Kamera erkannten Fläche einblenden (Teichrew, Erb, Wilhelm & Kuhn, 2019). Im Folgenden werden Besonderheiten der Erstellung und Gestaltung von dynamischen Modellen für AR-Experimente mit GeoGebra erläutert.

2.1. Erstellung von Lernmaterialien

GeoGebra erlaubt Lehrenden und Lernenden die Erstellung und Weitergabe eigener Medienprodukte und entspricht damit den aktuellen Trends im eLearning.

2.1.1. Open Educational Resources

Strenggenommen gehören die mit GeoGebra erstellten Materialeien nicht zu den Lehr- und Lernmaterialien, die als Public Domain öffentlich oder lizenzfrei und kostenlos verfügbar sind (Open Educational Resources – OER; Butcher & Moore, 2015). Aller-

dings benötigt lediglich der kommerzielle Gebrauch eine spezielle Lizenz. Für die Wissenschaft (wissenschaftliche Arbeiten und Konferenzen) und den Bildungsbereich (Lehrende und Lernende in Schulen und Universitäten) ist das Verwenden, Kopieren und Weitergeben von Material und Software frei („GeoGebra License“, 2020).

Über die Suchfunktion auf der Website von GeoGebra können veröffentlichte Materialien zu verschiedenen Themen gefunden und in der vom Autor beabsichtigten Weise bearbeitet werden. Mit der großen Anzahl und freien Verfügbarkeit geht unweigerlich eine Beliebigkeit der gestalterischen und inhaltlichen Qualität einher. Hier kommt es auf die Kompetenz der Lehrenden an, die angebotenen Materialien zu sichten.

2.1.2. Bring Your Own Device

Die mit GeoGebra erstellten Lernmaterialien lassen sich mit gängigen Smartphones oder Tablets öffnen und bearbeiten, was den regelmäßigen Einsatz von dynamischen Modellen mit den bei den Lernenden in der Regel vorhandenen Geräten möglich macht (Bring Your Own Device – BYOD). Allerdings wird der AR-Modus nicht von allen Geräten unterstützt („ARCore supported devices“, 2020). Vor der Durchführung müsste sichergestellt werden, dass in jeder Kleingruppe mindestens ein aktuelles Gerät vorhanden ist.

Dennoch garantiert der breite Zugang zu Geräten und Medien allein keine effektiven Einsatzszenarien. Im Hamburger Projekt zum offenen BYOD-Ansatz hat der vermehrte Einsatz digitaler Medien im Unterricht nicht dazu geführt, dass eine bessere Informationskompetenz erworben wurde als in der Kontrollgruppe. Der Grund könnte darin liegen, dass – wie die Lernenden in der Projektgruppe angegeben haben – sich die „Wahrnehmungen des vergangenen Unterrichts“ (Kammerl, Unger, Günther & Schwedler, 2016, S. 35) seit Beginn des Projekts nicht verändert haben. Eine Veränderung des üblichen Unterrichts wäre möglicherweise dann gegeben, wenn Lernende digitale Medien nicht nur konsumieren, sondern auch produzieren, und mithilfe von AR neue Formen der Interaktion von realen und virtuellen Inhalten kennenlernen.

2.1.3. User-Generated Content

Mit den Trends zur freien und niederschweligen Nutzung von online Materialien geht der Trend zur Erstellung solcher Materialien einher – und zwar nicht nur von Institutionen oder etablierten Medienkanälen, sondern von privaten Nutzerinnen und Nutzern (User-Generated Content – UGC). Lehrende und vor allem auch Lernende sollten in diesem Zusammenhang motiviert werden, Materialien auf den entsprechenden Plattformen nicht nur zu benutzen, sondern selbst zu erstellen oder verfügbare weiterzuentwickeln.

GeoGebra bietet dafür die Möglichkeit an, gefundene Materialien *in der App* zu öffnen, womit die volle

Kontrolle zur Anpassung des Materials erlangt wird. Die weiterentwickelte Konstruktion kann heruntergeladen oder im eigenen Profil gespeichert werden. Der Nutzer entscheidet selbst, ob das Material öffentlich auffindbar ist, nur über einen Link geteilt werden kann oder privat bleibt.

Im Vergleich zu AR-Apps von Softwareentwicklern, die auf einen bestimmten Inhalt zugeschnitten sind, ist zudem mit einer höheren Motivation zu rechnen, wenn eigenständig geschaffene oder angepasste dynamische Modelle in den realen Raum eingeblendet werden.

2.2. Gestaltung von Lernumgebungen

Der Einsatz von GeoGebra Apps im Unterricht erlaubt Lernaktivitäten anzustoßen, bei denen dem Lernenden ein Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, mit dem er selbst Objekte kreieren, Ideen visualisieren und Modelle entwerfen kann. Dadurch wird nach der Taxonomie von Schulmeister (2002) bereits ein hohes Interaktivitätsniveau erreicht. Bei einer Beschäftigung mit GeoGebra Materialien im Browser können zusätzlich solche Elemente ergänzt werden wie Text, PDF-Datei, Website, Video, Bild sowie offene Frage oder Mehrfachauswahl. Somit lassen sich im Rahmen von GeoGebra als Werkzeug Lernumgebungen gestalten, die Instruktionen, multimediale Ergänzungen, mehr oder weniger vorgefertigte dynamische Modelle und formativen Testverfahren enthalten.

Für eine erfolgreiche Vermittlung und Sicherung komplexer Sachverhalte muss allerdings darauf geachtet werden, dass neben der Möglichkeit zur eigenständigen Visualisierung physikalischer Ideen Räume für einen Diskurs der jeweiligen Lernprodukte geschaffen werden. Im Rahmen der Lernaktivitäten sind verschiedene Ergebnisse und Lernerfahrungen zu erwarten, die formuliert, dokumentiert und mit anderen geteilt werden können.

Naturwissenschaftlicher Unterricht darf sich jedoch nicht auf die Vermittlung theoretischer Konzepte beschränken. Zu einer erkenntnistheoretisch angemessenen Erschließung der Welt gehören die unmittelbare Wahrnehmung von Phänomenen sowie die praktische Überprüfung der angebotenen oder entwickelten Konzepte mithilfe von Experimenten.

3. AR-Experimente

Neben realen Anteilen enthalten Experimente zunehmend virtuelle Anteile. Wir bezeichnen damit theoretische Vorüberlegungen und computergenerierte Darstellungen, die der Realität nur bedingt entsprechen. Angelehnt an die Taxonomie von Milgram und Kishino (1994) für immersive Technologien bietet es sich im Bildungsbereich an, neben dem realen und virtuellen Raum sowie realen und virtuellen Objekten zusätzlich reale und virtuelle Inhalte zu unterscheiden, die mit dem jeweiligen Experiment vermittelt werden. Als AR-Experimente bezeichnen wir im Rahmen einer Klassifikation

digitalisierter Experimentierumgebungen Experimente, die im realen Raum stattfinden und bei denen reale Objekte ausdrücklich nicht durch virtuelle ersetzt werden. Experimente auf realen Tischen mit virtuellen Experimentiermaterialien, bei denen z. B. virtuelle Stromkreise reale Inhalte vermitteln sollen (Restivo et al., 2014), sehen wir als nicht unbedenkliche *Vermischung* der realen und virtuellen Umgebungen an (Mixed Reality; Teichrew & Erb, 2020a).

Stattdessen werden in AR-Experimenten reale Experimente mit virtuellen Objekten überlagert. Es findet eine *Erweiterung* realer Strukturen des Experiments mit virtuellen Objekten dort statt, wo nicht beobachtbare Elemente zum Verständnis des Experiments beitragen (Teichrew & Erb, 2020b). Für ein AR-Experiment mit GeoGebra müssen deshalb ideale Darstellungen in Form von dynamischen Modellen vorliegen, die auf abstrakten naturwissenschaftlichen Ideen und Konzepten basieren. Sie vermitteln *virtuelle Inhalte*, die dabei helfen, das Zustandekommen *realer Inhalte* in Form von Beobachtungen und Messwerten nachvollziehen zu können. Bevor dies geschehen kann, müssen die dynamischen Modelle mit Wischgesten sowie Schieberegler an reale Situationen angepasst werden. Wir unterscheiden deshalb Phasen zur Konstruktion und Testung eines Modells, um in diesem Zusammenhang auch Idealisierungen zu reflektieren (Erb & Teichrew, 2020; Winkelmann, 2019).

Im Folgenden werden AR-Experimente aus der Mechanik, der Elektrizitätslehre und der Optik vorgestellt sowie ihre realen und virtuellen Bestandteile erläutert. Aus diesen Beispielen lassen sich weitere AR-Experimente ableiten, die auf denselben didaktischen Konzepten basieren.

3.1. Mechanik

Sowohl in traditionellen Lehrgängen als auch im 2DD-Mechaniklehrgang von Hopf, Wilhelm, Walter, Tobias und Wiesner (2016) werden Kräfte als vektorielle Größen eingeführt und anhand von Pfeilbildern visualisiert. Die Beschleunigung eines Körpers (bzw. seine „Zusatzgeschwindigkeit“) wird mithilfe der Newtonschen Bewegungsgleichung bestimmt. Werden jedoch zwei oder mehr Kräfte auf ihn ausgeübt, müssen diese Kräfte zuvor durch die resultierende Kraft ersetzt werden, indem die Kraftvektoren addiert werden.

Betrachtet man beispielsweise einen Wagen auf der schiefen Ebene, lässt sich an der Anzeige des Kraftmessers der Betrag der resultierenden Kraft \vec{F}_H in Abhängigkeit vom Neigungswinkel α ablesen. In dem zuvor behandelten Modell setzt sich \vec{F}_H aus den Vektoren der Gewichtskraft \vec{F}_G und der Normalkraft \vec{F}_N zusammen, für die es in dem vorliegenden realen Experiment zunächst keine sichtbaren Anzeichen gibt (s. Tab.1). In einem AR-Experiment hingegen lässt sich dieser *virtuelle Inhalt* mithilfe der Kraftpfeile als *virtuelle Objekte* nicht nur veranschaulichen, sondern auch quantitativ bestätigen (s. Abb.1).

	real	virtuell
Objekte	Wagen auf der schiefen Ebene	Kraftpfeile
Inhalte	Anzeige des Kraftmessers	Addition der Kraftvektoren

Tab.1: Überblick über die Objekte und Inhalte zum AR-Experiment *Kräfte an der schiefen Ebene*.

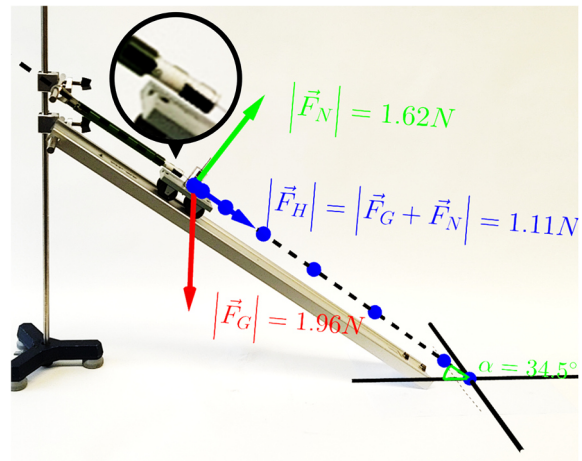


Abb.1: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments *Kräfte an der schiefen Ebene*

Das verwendete Modell lässt sich dynamisch an den im Experiment gewählten Winkel anpassen und sagt den Betrag der resultierenden Kraft für die Masse des Wagens voraus. Es wird davon ausgegangen, dass keine Reibung zwischen dem Körper und der schiefen Ebene vorliegt, was in der Realität nicht der Fall ist. Damit können etwaige systematische Abweichungen erklärt werden, die nicht mit der Genauigkeit der Messung und Ausrichtung des Modells zusammenhängen. Dieser Sachverhalt lässt sich im nächsten Schritt durch eine Erweiterung des Modells um eine Reibungskraft untersuchen.

3.2. Elektrizitätslehre

Unterrichtskonzepte zur Einführung in die Elektrizitätslehre, die die Spannung in Form von Potentialunterschieden vor dem Strom behandeln, haben sich als vergleichsweise lernförderlich erwiesen (Burde & Wilhelm, 2016). Das elektrische Potential (bzw. der „elektrische Druck“) wird mithilfe unterschiedlicher Farben und Intensitäten visualisiert. Eine Batterie zieht demnach Elektronen kontinuierlich aus dem einen Leiterstück und pumpt sie in das andere, sodass an den Polen und anliegenden Leiterstücken stets maximale Farbunterschiede vorliegen (Rot und Blau). Dadurch liegen in einem einfachen Stromkreis Leiterstücke unterschiedlicher Farbe an einem Lämpchen an, sodass in Folge des Potential- bzw. „Druckunterschieds“ Elektronen durchströmen und das Lämpchen zum Leuchten bringen. Leiterstücke, die im Vergleich zum Lämpchen keinen wesentlichen Widerstand aufweisen, an denen folglich so gut

wie keine Spannung abfällt, werden in dem Modell idealisiert und durchgehend mit einer Farbe gefärbt.

Betrachtet man nun statt einem Lämpchen einen dünnen Leiter in Form eines Konstantendrahtes, lassen sich entlang des Drahtes verschiedene Spannungen zwischen zwei Punkten messen. Bei einer angelegten Spannung von 6 V gibt es an den Enden des Konstantendrahtes den maximalen Potentialunterschied

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 3\text{ V} - (-3\text{ V}) = 6\text{ V}. \quad \{1\}$$

Im realen Experiment lassen sich die Werte für das Potential im Draht allerdings nicht messen (s. Tab.2). In einem AR-Experiment hingegen wird das Potential mit einem intensiven Rot für 3 V und einem intensiven Blau für -3 V farbcodiert. Dazwischen nimmt die Intensität bis zur Farbe Weiß bei 0 V linear ab bzw. wieder zu. Dementsprechend liegen zwischen je zwei Punkten stets Potentialunterschiede vor, die im realen Experiment als Spannung gemessen werden können (s. Abb.2).

	real	virtuell
Objekte	Konstantendraht	Potential als Farbcodierung
Inhalte	abgegriffene Spannung	sichtbare Potentialunterschiede

Tab.2: Überblick über die Objekte und Inhalte zum AR-Experiment *Spannung am stromdurchflossenen Leiter*

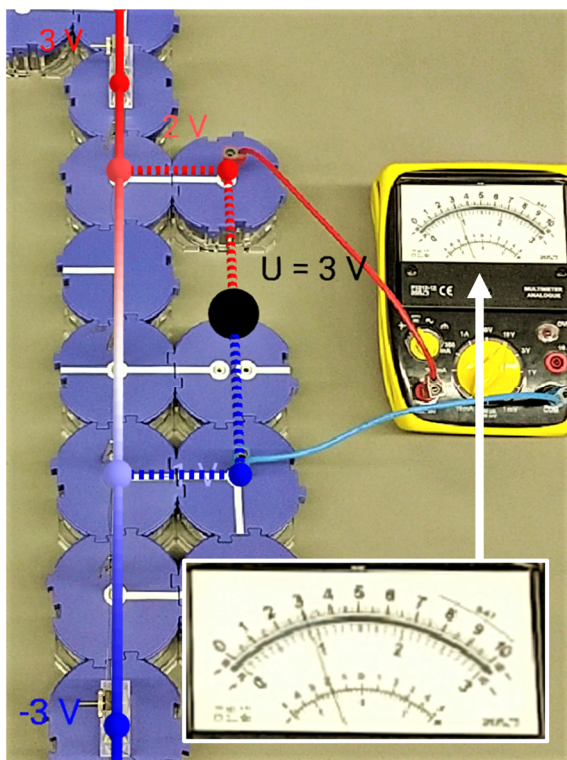


Abb.2: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments *Spannung am stromdurchflossenen Leiter*

Der Draht ist links im Bild von der oberen Ecke (3 V) bis zur unteren (-3 V) gespannt und wird mit

einer farbigen Linie überblendet. Schaltelemente mit Krokodilklemmen und Kontakten erlauben es, die Spannung entlang des Drahtes zu messen (gestrichelte Linien mit Voltmeter). Wird die Spannung im realen Experiment an anderen zwei Punkten im selben Abstand abgegriffen wie in Abbildung 2, kann wieder 3 V gemessen werden. Im dynamischen Modell werden dafür die Punkte verschoben, sodass dieselbe Spannung vorausgesagt wird, allerdings setzt sie sich in diesem Fall aus anderen Werten und Farben für das Potential zusammen.

Es bleibt anzumerken, dass auch hier das Modell nicht ganz der Realität entspricht, was sich im Experiment beobachten lässt: Je größer der reale Widerstand der Leiterstücke ist, die von der Spannungsquelle zu den Enden des Konstantendrahtes (oder eines Lämpchens) führen, desto mehr Spannung fällt an ihnen ab. Eine variable Spannungsquelle muss deshalb hochreguliert werden, bis an den Enden des Drahtes tatsächlich die gewünschten 6 V anliegen.

3.3. Optik

Im traditionellen Optikunterricht wird frühzeitig auf die Beschreibung des Lichts in Form von Lichtstrahlen eingegangen. Somit kann schnell der Eindruck entstehen, Licht bestehe aus Lichtstrahlen. Diese eignen sich jedoch lediglich als geometrische Konstruktionshilfen. Im Lichtwegkonzept wird die allseitige, geradlinige Ausbreitung von Licht mit Lichtwegen eingeführt, die entlang von Schattengrenzen verfolgt werden können (Erb & Schön, 1996). Die geometrische Betrachtung von Lichtwegen mithilfe des Fermat-Prinzips führt im weiteren Verlauf zum Reflexionsgesetz.

Betrachtet man beispielsweise eine Münze vor einem Spiegel, lässt sich in dieser realen Situation zwar der Ort des Spiegelbildes der Münze beobachten, aber keine Lichtstrahlen (s. Tab.3). In einem AR-Experiment lassen sich hingegen verschiedene Lichtwege einer Punktlichtquelle über der Münze nachverfolgen, die auf die Spiegelachse auftreffen und nach dem hergeleiteten Reflexionsgesetz reflektiert werden. Die Lichtwege werden hinter den Spiegel verlängert und kreuzen sich dort in einem Punkt, der sich genau über dem Ort des Spiegelbildes der Münze befindet (s. Abb.3). Bewegt man die Kamera hinter den Spiegel, ist das Spiegelbild nicht mehr sichtbar, aber die Kreuzung der verlängerten Lichtwege lässt sich markieren und mit dem Ort der Münze vergleichen.

	real	virtuell
Objekte	Spiegel und Münze	Lichtwege
Inhalte	Ort des Spiegelbildes	Kreuzung verlängerter Lichtwege

Tab.3: Überblick über die Objekte und Inhalte zum AR-Experiment *Entstehung des Spiegelbildes*

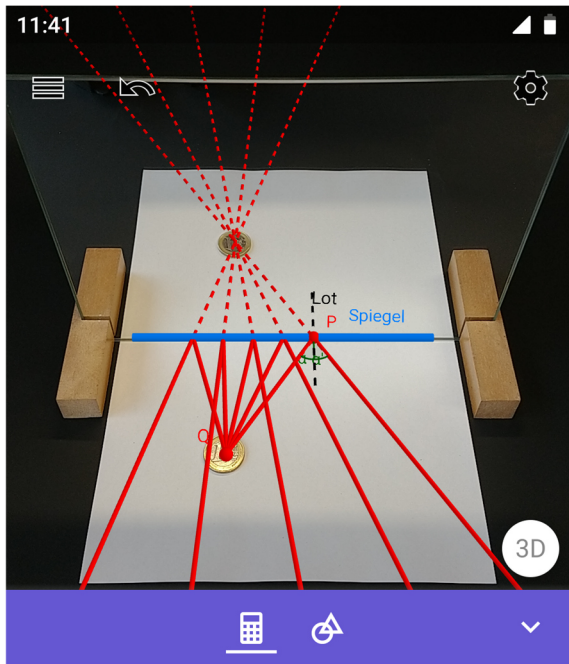


Abb.3: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments *Entstehung des Spiegelbildes*

Wird die Münze an eine andere Stelle vor oder neben dem Spiegel geschoben, lässt sie sich wieder mit der Punktlichtquelle überlagern. Die reflektierten Lichtwege zeigen die Richtung an, aus der das Spiegelbild trotzdem sichtbar ist, und der Ort des Spiegelbildes wird wiederum über die Kreuzung der verlängerten Lichtwege angezeigt. Das auf diese Weise eingeführte Prinzip findet im weiteren Unterrichtsverlauf eine Anwendung bei optischen Abbildungen.

Bei genauerer Betrachtung liegen in diesem Modell ebenfalls zahlreiche Idealisierungen vor, die im Unterricht diskutiert werden können: Es werden beispielsweise nicht alle denkbaren Lichtwege gezeigt und die Münze ist keine Punktlichtquelle. Nichtsdestotrotz erfüllt das Modell den Zweck, den Ort des Spiegelbildes anhand von ausgewählten Lichtwegen vorherzusagen.

4. Fazit

Die Visualisierung abstrakter Inhalte hat eine lange Tradition in den Naturwissenschaften und ihrer Didaktik. Mit dem Einsatz von digitalen Medien wie der Geometrie-Software GeoGebra können Konstruktionen nicht nur effizient angefertigt, sondern auch zu dynamischen Modellen weiterentwickelt werden. Der verbreitete Zugang von Lernenden zu mobilen Geräten erlaubt darüber hinaus das aktive Gestalten eigener Modelle. Neben digitalen Kompetenzen kann dadurch das Modellverständnis als Teil des Naturwissenschaftsverständnisses im Unterricht gefördert werden.

Die Verwendung des AR-Modus in der App GeoGebra 3D Grafikkrechner erlaubt den Lernenden zudem die Einblendung virtueller Objekte in den realen Raum. Anstelle mit AR-Technologie die

Realität nachzuahmen oder Messwerte einzublenden, schlagen wir als Anwendung für den Physikunterricht die Einblendung von den Objekten vor, die für sich genommen bereits eine *Erklärungsmächtigkeit* besitzen, jedoch normalerweise als „mathematische Idealgestalten in der Welt der naturwissenschaftlichen Ideen“ (Muckenfuß, 2001) gefangen sind: Kraftpfeile, elektrische Potentiale und Lichtwege. Die Erweiterung realer Experimente mit idealen Darstellungen ermöglicht es, die Welt mit den Augen der Physik durch den Bildschirm eines Smartphones zu sehen und hoffentlich besser zu verstehen.

5. Literatur

- ARCore supported devices. (2020). *Google Developers*. Zugriff am 19.5.2020. Verfügbar unter: <https://developers.google.com/ar/discover/>
- Bloxham, J. (2014). *Augmented Reality Learning*. *ITNOW*, 56(3), 44–45. Oxford Academic.
- Burde, J.-P. & Wilhelm, T. (2016). Die Elektrizitätslehre mit dem Elektronengasmodell. *PdN Physik in der Schule*, 65(8), 18–24.
- Butcher, N. & Moore, A. (2015). *Understanding Open Educational Resources*. Commonwealth of Learning (COL).
- Carmigniani, J. & Furht, B. (2011). *Augmented Reality: An Overview*. In B. Furht (Hrsg.), *Handbook of Augmented Reality*. New York, NY: Springer New York.
- Erb, R. (2016). *Optik mit GeoGebra*. Berlin: De Gruyter.
- Erb, R. & Schön, L. (1996). Ein Blick in den Spiegel - Einblick in die Optik. *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek II*. Bonn: F. Dümmers Verlag.
- Erb, R. & Teichrew, A. (2020). Geometrische Optik mit GeoGebra. *NiU Physik*, 31(175), 24–28.
- GeoGebra License. (2020). *GeoGebra*. Zugriff am 19.5.2020. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/license>
- Hattie, J., Beywl, W. & Zierer, K. (2013). *Lernen sichtbar machen*. Baltmannsweiler: Schneider-Verl. Hohengehren.
- Hopf, M., Wilhelm, T., Walter, C., Tobias, V. & Wiesner, H. (2016). *Einführung in die Mechanik* (4. Auflage). München, Frankfurt: gedruckt in großer Stückzahl in Eigenregie. Zugriff am 25.5.2020. Verfügbar unter: http://www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch_Druckversion.pdf
- de Jong, T. (2006). COMPUTER SIMULATIONS: Technological Advances in Inquiry Learning. *Science*, 312(5773), 532–533.
- Kammerl, R., Unger, A., Günther, S. & Schwedler, A. (2016). *BYOD - Start in die nächste Generation. Abschlussbericht der wissenschaftlichen*

- Evaluation des Pilotprojekts*. Hamburg: Universität Hamburg.
- Laumann, D., Wichtrup, P. & Friege, G. (2019). Zwei Schlüssel zur Physik - Reale Experimente und digitale Medien als Schlüssel zu physikalischen Inhalten. *NiU Physik*, 30(171), 4–9.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Trans. Information Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- Mishra, P. & Koehler, M. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record*, 108, 1017–1054.
- Muckenfuß, H. (2001). Retten uns die Phänomene? Anmerkungen zum Verhältnis von Wahrnehmung und Theorie. *NiU Physik*, 12(63–64), 74–77.
- Pietzner, V. (2009). Computer im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ergebnisse einer Umfrage unter Lehrkräften. *ZfDN*, 15, 47–67.
- Puentedura, R. R. (2006). Transformation, Technology, and Education. Zugriff am 19.5.2020. Verfügbar unter: <http://www.hippasus.com/resources/tte/>
- Restivo, M. T., Chouzal, M. de F., Rodrigues, J., Menezes, P., Patrão, B. & Lopes, J. B. (2014). Augmented Reality in Electrical Fundamentals. *iJOE*, 10(6), 68–72.
- Schmid, U., Goertz, L., Behrens, J. & Bertelsmann Stiftung. (2017). Monitor Digitale Bildung : Die Schulen im digitalen Zeitalter. BStift - Bertelsmann Stiftung.
- Schulmeister, R. (2002). Taxonomie der Interaktivität von Multimedia- Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. *it - Information Technology*, 44(4).
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching. Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, 57(1), 1–22.
- Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*, 53(4), 045009. IOP Publishing.
- Suleder, M. (2020). Eine kurze Geschichte der Videoanalyse. *Plus Lucis*, (1), 4–6.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2018). Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020a). Hauptsache Augmented? Klassifikation digitalisierter Experimentumgebungen. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule und Digitalisierung*. Münster: Waxmann.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020b). Einsatz und Evaluation eines Augmented Reality-Experiments zur Optik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019* (S. 987–990). Universität Duisburg-Essen.
- Teichrew, A., Erb, R., Wilhelm, T. & Kuhn, J. (2019). Elektrostatische Potentiale und Felder im GeoGebra 3D Grafikrechner. *Physik in unserer Zeit*, 50(5), 254–255.
- Weber, J. & Wilhelm, T. (2020). The benefit of computational modelling in physics teaching: a historical overview. *European Journal of Physics*, 41(3), 034003.
- Winkelmann, J. (2019). Idealisierungen und Modelle im Physikunterricht. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Zierer, K. (2018). *Lernen 4.0: Pädagogik vor Technik: Möglichkeiten und Grenzen einer Digitalisierung im Bildungsbereich* (2., erweiterte Auflage.). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren GmbH.