

Augmented Reality ermöglicht es, reale Situationen auf dem Bildschirm eines Mobilgeräts um virtuelle Objekte zu erweitern. Dieses Beispiel demonstriert das Zustandekommen des Spiegelbildes mithilfe verlängerter Lichtwege, indem das dynamische Modell über das reale Experiment gelegt wird.

Dynamisch modelliert

Der Erkenntnisgewinn erfordert auch im Physikunterricht neben Experimenten eine theoriegeleitete Modellierung der Phänomene.

Albert Teichrow und Roger Erb

Experimente erfüllen im Physikunterricht eine wichtige Funktion. Sie können ein Phänomen anschaulich zeigen, zum Handeln motivieren oder helfen, eine Hypothese zu überprüfen. Für die Erkenntnisgewinnung ist der letzte Punkt entscheidend. Hierzu gilt es vorab, eine Fragestellung und eine Hypothese zu generieren. Im Idealfall machen die Schülerinnen und Schüler selbst Annahmen und überprüfen sie. Sobald es aber um mehr als eine einfache Entscheidung zum qualitativen Ausgang eines Experiments geht, ist eine theoriegeleitete, mathematische Modellierung des Phänomens notwendig.

Für eine Reihe von Themen ist das mathematische Modellieren eines physikalischen Phänomens so aufwändig, dass im Physikunterricht nicht im Vorfeld modelliert, sondern im Nachgang eines Experiments

ein bestimmter Befund mit physikalischen Gesetzen oder Prinzipien erklärt wird. Im ersten Moment stellen solche Erklärungen zufrieden, weil sie eine plausible fachliche Begründung liefern, die über die reine Beobachtung oder den vorherigen Kenntnisstand hinausgeht. Allerdings werden dieselben physikalischen Sachverhalte im Laufe der Schulzeit mehrfach aufgegriffen – mit zunehmendem Komplexitätsgrad. So wird das Fallen eines Apfels vom Baum vorläufig mit seiner Schwere in Verbindung gebracht, später mit der Gewichtskraft und schließlich mit der Gravitationswechselwirkung oder sogar mit der Idee einer gekrümmten Raumzeit innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Somit gibt es für viele Sachverhalte unterschiedliche Beschreibungen, die sich z. B. in formalen Gesichtspunkten oder ihrer Genauigkeit und Komplexität unterscheiden. Erkenntnistheoretisch ist die Rede von verschiedenen naturwissenschaftlichen Modellen als Repräsentanten

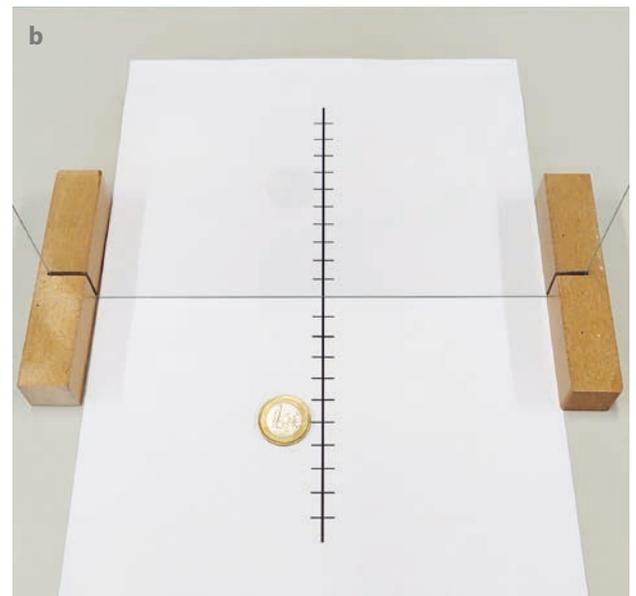
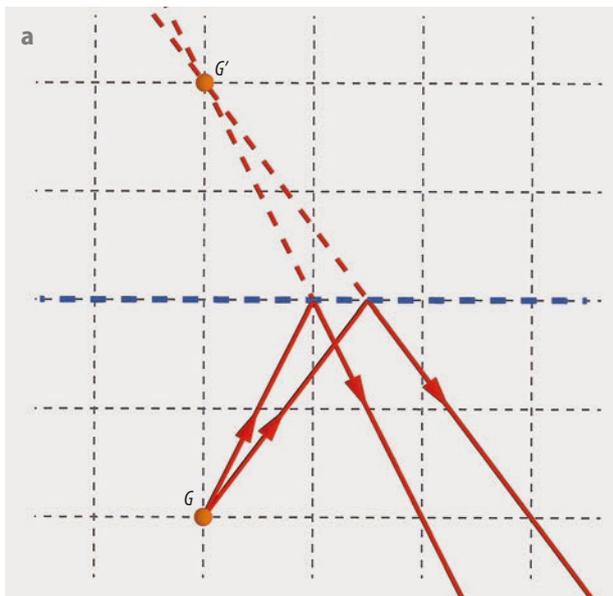


Abb. 1 Das dynamische Modell zeigt die Entstehung des Spiegelbildes mittels Konstruktion der geometrischen Optik (a) [5]. Der Punkt G markiert den Ort des Gegenstandes, G' den Ort des Spiegelbildes, an dem sich die gedachten Verlängerungen zweier Lichtwege schneiden. Pfeile zeigen die Richtung der Lichtausbreitung. Im realen Experiment lässt sich die Position des Spiegelbildes überprüfen (b).

eines Phänomens. Keines dieser Modelle ist allerdings eine vollständige Erklärung, sondern lediglich ein möglicher Weg, das Phänomen greifbar zu machen und es innerhalb gewisser Grenzen zu verstehen. Verstehen im physikalischen Sinne bedeutet, eine Beobachtung einem bekannten physikalischen Phänomen zuzuordnen und mit einem Modell auf eine mehr oder weniger komplexe Art und Weise zu beschreiben. Für ein besseres Verständnis der Naturwissenschaften sollten die im Unterricht oder Studium kennengelernten Darstellungen, Fachbegriffe und formulierten Zusammenhänge stets als Modelle – also mögliche Beschreibungen physikalischer Sachverhalte, die sich in Experimenten bewährt haben – aufgefasst werden. Vor allem in Zeiten vermehrter Wissenschaftsskepsis spielt eine solche Reflexion über den Erkenntnisprozess und die Glaubwürdigkeit wissenschaftlichen Wissens im Unterricht eine große Rolle [1].

Dynamische Geometrie-Software

Es gibt viele Möglichkeiten, geometrische Darstellungen mit dem Computer zu konstruieren. Eine Dynamische Geometrie-Software (DGS) erlaubt es zusätzlich, die fertige Konstruktion dynamisch zu variieren – entweder mithilfe von Schieberegler, welche eine Konstruktion durch eine Variable quasi-stetig verändern, oder indem man Punkte auf der Grafikoberfläche mit der Maus verschiebt (Zugmodus). Durch das Verschieben freier Objekte verändern sämtliche abhängigen Objekte ihre Lage. Dies visualisiert Abhängigkeiten, die in einer statischen Konstruktion nicht sichtbar wären. So lassen sich im Mathematikunterricht geometrische Konstruktionen anfertigen oder Funktionen darstellen und deren Änderungsverhalten analysieren. Eine DGS erlaubt es auch, die geometrischen und algebraischen Grundlagen vieler physikalischer Phänomene dynamisch zu modellieren. Die für Bildungs- und Forschungszwecke frei verfügbare Software GeoGebra bietet hierfür ein umfangreiches Funktionspaket.

Hilfreich ist der Einsatz einer Dynamischen Geometrie-Software (DGS, **Infokasten**). Die ursprünglich für den Mathematikunterricht entwickelte Software GeoGebra ermöglicht es ohne großen Aufwand, Modelle zu konstruieren, welche die physikalischen Prinzipien dynamisch und damit auf Veränderungen reagierend visualisieren. Interaktive Lernmaterialien liegen für viele mathematische und physikalische Themen vor, die auf geometrische Sachverhalte zu reduzieren sind, beispielsweise die geometrische oder auch die Wellen- und Quantenoptik [2].

Physikalische Modellbildung am Spiegelbild

In der physikalischen Modellbildung nimmt die Vorstellung, dass Ideen und Erkenntnisse über natürliche oder vom Menschen geschaffene Phänomene zunächst in Form von inneren (gedanklichen) und später auch äußeren (gegenständlichen, bild- oder symbolhaften) Modellen vorliegen, unabhängig von einer möglicherweise eingesetzten Software einen zentralen Platz ein. Die Konstruktion von Modellen zur Beschreibung von Phänomenen bei der Suche nach Erklärungen ist ein elementarer Teil des wissenschaftlichen Denkens und daher auch ein Bestandteil didaktischer Forschungs- und Entwicklungsarbeit [3]. Abstrakte naturwissenschaftliche Ideen und Prinzipien bilden die Basis für Modelle komplexer physikalischer Sachverhalte. Computergenerierte dynamische Modelle helfen nicht nur, das dahinter liegende physikalische Konzept zu visualisieren, sie sind auch in der Lage, das Verhalten des untersuchten Systems innerhalb der Modellgrenzen zu simulieren. Sie gelten daher als experimentierfähige Modelle. Die aus dem Modell abgeleiteten Hypothesen müssen sich jedoch zunächst am realen Experiment messen, bevor man von einer Erkenntnis in einem abgeschlossenen Prozess der Modellbildung und nicht nur einer hypothetischen Modellierung sprechen kann (mehr dazu in [4]).

Das Beispiel des Spiegelbildes am ebenen Spiegel soll die physikalische Modellbildung verdeutlichen. Ein mit GeoGebra erstelltes dynamisches Modell visualisiert das abstrakte Modell, das auf der geradlinigen Lichtausbreitung und dem Reflexionsgesetz basiert (**Abb. 1a**). Mittels der bekannten Konstruktion lässt sich der Ort G' des Spiegelbildes eines Gegenstands im Punkt G bestimmen. Das Spiegelbild scheint sich für alle Beobachterinnen und Beobachter an dieser Stelle zu befinden. Um eine Hypothese für die Position des Spiegelbildes abzuleiten, kann man nun andere Positionen der realen Lichtquelle einstellen und mit dem Schnittpunkt vergleichen: Es liegt hinter dem Spiegel und hat denselben Abstand zum Spiegel wie der Gegenstand. Das reale Experiment erlaubt es, dieses Ergebnis zu überprüfen (**Abb. 1b**).

Augmented Reality mit dynamischen Modellen

Augmented Reality (AR) bedeutet, mit technischen Hilfsmitteln die reale Umgebung um virtuelle Objekte zu erweitern. Dazu wird entweder die Kameraansicht der Umgebung auf einem Bildschirm oder die Sicht durch eine Brille in Echtzeit mit zusätzlichen Bildern überblendet. Verändert sich die Position des Mobilgeräts oder der Brille, bleiben die virtuellen Objekte an ihrer zugewiesenen Position. Auf diese Weise wirkt ihre Anwesenheit im Raum fast natürlich – im Unterschied zu Virtual Reality (VR), wo die reale Umgebung vollständig durch eine virtuelle ersetzt wird.

Wir nutzen AR, um reale Experimente mit virtuellen Objekten zu ergänzen, die zum Verständnis des Experiments beitragen [6]. Dazu verwenden wir die mit GeoGebra konstruierten dynamischen Modelle, die sich mittels der zugehörigen App auf dem Mobilgerät öffnen und ohne spezielle Marker auf jeder erkannten Fläche einblenden lassen (**Infokasten**). Die interagierende Person muss Modell und Realität selbstständig mit intuitiven Touch-Gesten in Übereinstimmung bringen. Dies fordert dazu auf, sich bis zur Überprüfung der Ergebnisse aktiv mit den Parametern und Annahmen des Modells auseinanderzusetzen. Zudem ist es möglich, unterschiedliche Experimentiersituationen zu untersuchen und zu protokollieren.

Das Ziel dabei ist, den Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung erlebbar zu machen. Denn erfolgt im Physikunterricht keine Modellierung, steht das Experiment für sich allein. Die Arbeit mit experimentierfähigen Modellen ermöglicht es, die Modellaussagen mit den Ergebnissen des Experiments zu vergleichen. In AR-Experimenten gelingt es sogar, beides unmittelbar anzupassen. Bei der Arbeit mit Modell und Experiment lernen die Schülerinnen und Schüler, zwischen Konstrukt und Beobachtung zu unterscheiden. Dies veranschaulicht die naturwissenschaftliche Arbeitsweise.

Im Experiment zur Position des Spiegelbildes lassen sich in der realen Situation zwar die Lage der Gegenstände und der Ort des Spiegelbildes der Münze beobachten, aber keine modellhaften Lichtwege, welche die Entstehung des Spiegelbildes physikalisch beschreiben. Das passende AR-Experiment erlaubt es jedoch, die Lichtwege einer Punktlichtquelle nachzuverfolgen, als ob sie von einem Punkt

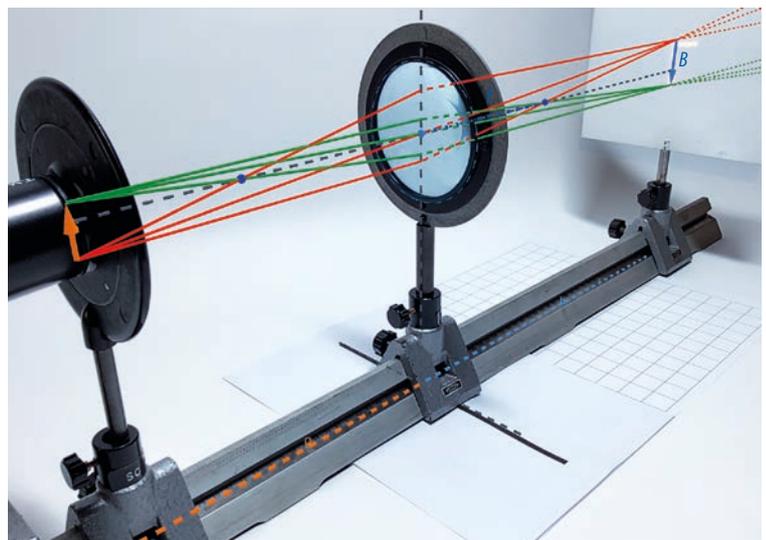


Abb. 2 Mittels Augmented Reality lässt sich der Aufbau zur optischen Abbildung mit einem dynamischen Modell zur Brechung an der Mittelebene überlagern.

auf der realen Münze ausgehen würden. Verschiebt man den Punkt G zur Münze, befindet sich der Schnittpunkt der Verlängerungen hinter dem Spiegel G' am Ort des Spiegelbildes. Dies zeigt anschaulich, dass die abstrakte physikalische Sichtweise beobachtbare Ergebnisse vorhersagen kann. Mit entsprechenden Arbeitsblättern [7] und Mobilgeräten können solche einfachen AR-Experimente eigenständig in Gruppen erfolgen. Die folgenden Beispiele eignen sich dagegen eher für eine Demonstration durch die Lehrkraft, wobei der Bildschirm des verwendeten Mobilgeräts mit einem Beamer auf eine Leinwand gespiegelt wird.

Weitere Beispiele

In der Praxis wird der genaue Verlauf des Lichts durch optische Instrumente wie Brillen, Lupen, Ferngläser oder Mikroskope selten betrachtet. Stattdessen geht es darum, die Eigenschaften der Bilder zu untersuchen. Auch der Physikunterricht behandelt die Konstruktion optischer Abbildungen an dünnen Linsen ausgiebig – mittels Konstruktionsregeln für die Lichtstrahlen und zahlreicher Übungen. Trotzdem werden meist nur wenige Fälle so modelliert, dass die vorhergesagte Bildgröße mit der realen Bildgröße auf dem Schirm zu vergleichen ist.

Augmented Reality mit Mobilgeräten

Die Programmierschnittstellen ARCore (developers.google.com/ar) von Google oder ARKit (developer.apple.com/augmented-reality/) von Apple ermöglichen es Smartphones und Tablets, die Umgebung zu erkennen und 3D-Objekte im Kamerabild in der richtigen Perspektive zu platzieren: Im aufgenommenen Kamerabild werden zunächst markante Punkte erkannt. Die visuellen Informationen werden mit Messungen des Beschleunigungssensors und Gyroskops kombiniert, sodass die Position und Ausrichtung der Kamera relativ zur Umgebung in Echtzeit abzuschätzen ist. Die Software platziert die 3D-Objekte so in das Kamerabild, dass Position und Ausrichtung der virtuellen Kamera mit der Gerätekamera übereinstimmen. Im Gegensatz zu VR-Anwendungen bleibt das Gerät hierbei in den Händen der Nutzerinnen und Nutzer.

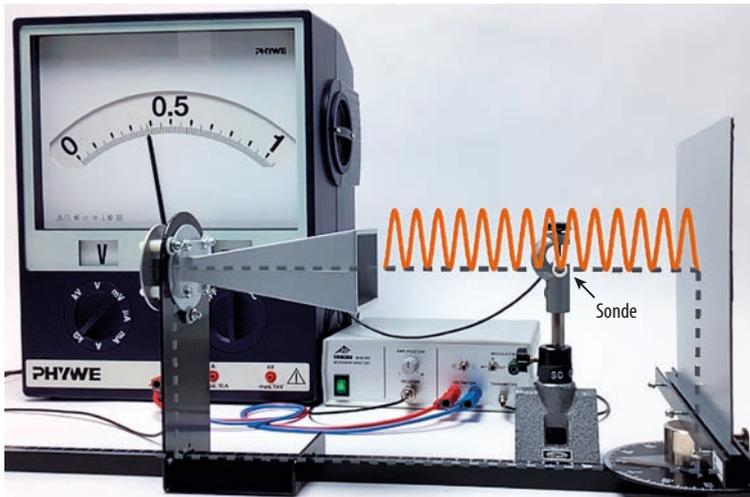


Abb. 3 Im dynamischen Modell zu stehenden Wellen überlagern sich Mikrowellen nach der Reflexion an einer Metallplatte.

Mit einem auf den Konstruktionsregeln basierenden Modell lassen sich verschiedene Brenn- und Gegenstandsweiten einstellen, um die Position des scharfen Bildes und die Bildgröße zu berechnen und zu visualisieren [8]. Das dynamische Modell eignet sich für die Überlagerung eines Versuchsaufbaus, der aus einem selbstleuchtenden Gegenstand, einer Sammellinse und einem Schirm besteht (**Abb. 2**). Darauf aufbauend gelingt es, Modelle für Zerstreuungslinsen, Linsensysteme oder Hohl- und Wölbspiegel zu erstellen. Bei regelmäßigem Einsatz von GeoGebra im Mathematikunterricht könnte das eigenständige Modellieren eine weiterführende Aufgabe im Physikunterricht sein.

Um Phänomene wie Beugung und Interferenz zu modellieren, wird Licht im Rahmen der Wellenoptik als elektromagnetische Welle beschrieben. Aber auch die Wellenvorstellung ist nur ein mathematisches Hilfsmittel, um experimentelle Ergebnisse vorherzusagen. Im folgenden Beispiel wird eine ebene Welle modelliert, die sich in x -Richtung ausbreitet und in einem gewissen Abstand an einer Metallplatte reflektiert wird [9]. Diese Reflexion führt zu einer in entgegengesetzter Richtung verlaufenden Welle mit einem Phasensprung von π . Die Überlagerung der beiden Wellen führt zu einer stehenden Welle. Das Betragsquadrat der Überlagerung liefert in erster Näherung eine Vorhersage für den Intensitätsverlauf des Signals. Im Experiment misst eine Sonde, die zwischen Mikrowellensender und Metallplatte bewegt wird, regelmäßig Intensitätsminima und -maxima (**Abb. 3**). Beim Einstellen auf eine Wellenlänge von 3 cm stimmen die Abstände etwa überein. Allerdings wird das Signal in den Minima aufgrund von Pfadverlusten nicht null. Auch Phänomene der Beugung bei sichtbarem Licht lassen sich modellieren [2].

Ausblick

Der Physikunterricht soll neben den fachlichen Inhalten auch die Methoden der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung beleuchten. Eine DGS wie GeoGebra bietet die Möglichkeit, experimentierfähige Modelle zu erstellen. Mithilfe von AR ist es zusätzlich möglich, das modellierte

Ergebnis unmittelbar mit dem Experiment zu vergleichen. Dies fördert neben der fachlichen auch die Methodenkompetenz der Lernenden. In einer qualitativen Studie bekamen Schülerinnen und Schüler der 10. Klasse auf einem Spielplatz die Möglichkeit, mit dynamischen Modellen Phänomene an der Rutsche (mit dem Konzept der schiefen Ebene) sowie an der Wippe (mit dem Hebel) zu deuten und anschließend AR-Experimente an den Spielplatzgeräten durchzuführen. Dies erweiterte ihr Verständnis der zugrundeliegenden mechanischen Zusammenhänge durch die Verknüpfung von Modell und Experiment. Außerdem waren die Lernenden danach in der Lage, das AR-Experiment unter anderem als Überprüfung des Modells wahrzunehmen. So gelang es, die visuelle, affektive, kognitive und experimentelle Unterstützung des Lernens mit dynamischen Modellen und AR-Experimenten zu zeigen [10]. Zudem verbesserte sich während des Distanzunterrichts in einem Online-Kurs mit dynamischen Modellen und Bildschirmexperimenten das Konzeptverständnis zur Optik [11]. Im Schülerlabor der Goethe-Universität Frankfurt ist derzeit eine Studie zu digitalen und methodischen Kompetenzen mit mehreren AR-Experimenten in Vorbereitung.

Literatur

- [1] D. Höttecke und D. Allchin, *Sci. Educ.* **104**, 641 (2020)
- [2] R. Erb, *Optik mit GeoGebra*, De Gruyter, Berlin/Boston (2017), Modelle: www.geogebra.org/m/ceu3jJeM
- [3] A. Upmeyer zu Belzen, P. Engelschalt und D. Krüger, *Educ. Sci.* **11**, 495 (2021)
- [4] A. Teichrew und R. Erb, *MNU* **73**, 481 (2020)
- [5] A. Teichrew, *Spiegelbild* (2021), www.geogebra.org/m/afg5zven
- [6] A. Teichrew und R. Erb, *Phys. Educ.* **55**, 065029 (2020)
- [7] A. Teichrew und R. Erb, *Naturwissenschaften digital: Toolbox für den Unterricht* **2**, 20, Joachim Herz Stiftung, Hamburg (2021)
- [8] A. Teichrew, *Sammellinse* (2021), www.geogebra.org/m/aafg282w
- [9] A. Teichrew, *Stehende Welle* (2021), www.geogebra.org/m/wpr2nmah
- [10] J. Weber und A. Teichrew, *PhyDid B* (2021), www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1141
- [11] A. Teichrew und R. Erb, *GDCP* **41**, 205 (2021)

Die Autoren



Albert Teichrew (FV Didaktik der Physik) studierte gymnasiales Lehramt mit den Fächern Mathematik und Physik und beschäftigt sich für seine Promotion in der Physikdidaktik mit der Wirksamkeit von Lernumgebungen, die Modelle und Experimente unter anderem mithilfe von Augmented Reality bei der Erkenntnisgewinnung

gleichermaßen berücksichtigen.

Roger Erb (FV Didaktik der Physik) ist Professor für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität Frankfurt und befasst sich mit dem Experimentieren im Physikunterricht und dem Themengebiet Optik.

Prof. Dr. Roger Erb und **Albert Teichrew**, Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Didaktik der Physik, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt



Uwe Dettmar, U. Frankfurt