

## Augmented Reality-Experimente zur Wellenphysik

Albert Teichrew\*, Marlon Grasse\*

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

### Kurzfassung

Mit dem *GeoGebra 3D Rechner* lassen sich Visualisierungen abstrakter Strukturen modellieren und mithilfe der App auf einem Smartphone oder Tablet als virtuelle Objekte in den realen Raum platzieren. Damit wird eine Erweiterung realer Experimente mit idealen Darstellungen ermöglicht, die als Augmented Reality-Experimente bezeichnet werden. Virtuelle Bestandteile sollen reale Strukturen dort erweitern, wo nicht beobachtbare Elemente zum Verständnis des Experiments beitragen und den Vergleich von Modell und Realität erleichtern. Für Experimente mit Mikrowellen wurden vier Modelle konstruiert, die in der Lage sind, die Versuchsaufbauten nachzuempfinden und solche Wellenphänomene wie Reflexion, Beugung und Interferenz sichtbar zu machen. Die Messwerte aus dem Experiment können direkt mit dem Modell verglichen werden, um die in der Theorie entwickelten Annahmen zu überprüfen. In dem Beitrag werden Entwicklung und ein möglicher Unterrichtseinsatz von vier Augmented Reality-Experimenten zur Wellenphysik vorgestellt.

### 1. Hintergrund

Die Durchführung von Experimenten ist nicht nur eine verbreitete Methode des naturwissenschaftlichen Unterrichts, sondern ein wesentlicher Schritt der Erkenntnisgewinnung. Naturwissenschaftliches Wissen stützt sich zwar auf empirische Belege, der Weg dorthin ist allerdings subjektiv und theoriegeladen. Hinter dem Experiment als Frage an die Natur steht eine Frage an das Modell, mit dem die Natur im Vorfeld rekonstruiert wurde. Naturwissenschaftlicher Unterricht sollte deshalb ein Lernen mit Modellen und Experimenten in einem gemeinsamen Problemlöseprozess ermöglichen (vgl. Teichrew & Erb, 2020a).

Augmented Reality (dt. erweiterte Realität, AR) wird definiert als eine Echtzeitansicht einer physischen realen Umgebung, die durch Hinzufügen virtueller computergenerierter Informationen erweitert wurde (Carmigniani & Furt, 2011, S. 3). Technisch lässt sich AR dadurch realisieren, dass entweder der von der Kamera eingefangene Bildausschnitt auf einem Bildschirm oder das Sichtfenster einer Brille mit virtuellen Objekten überlagert wird. In den meisten Fällen wird ein immersiver Effekt angestrebt, bei dem die virtuellen Objekte bei Veränderung der Position des mobilen Geräts oder der Brille an der zugewiesenen Stelle relativ zum realen Raum verbleiben. Reale Situationen können dadurch um virtuelle Informationen erweitert werden, die einen erkennbaren Bezug zur Realität enthalten und abstrakte Konzepte damit leichter verständlich werden (Bloxham, 2014). Meta-Analysen haben gezeigt, dass mit AR das Lernen in verschiedenen Inhaltsbereichen (Garzón & Acevedo, 2019) und mit verschiedenen Unterrichtsmethoden verbessert werden kann (Garzón, Kinshuk, Baldiris, Gutiérrez & Pavón, 2020).

### 1.1. AR-Experimente

Für das Lehren und Lernen der Physik verfolgen wir das Ziel, Experimente im realen Raum mithilfe von AR mit virtuellen Objekten zu erweitern, die zum Verständnis des Experiments beitragen (vgl. Teichrew & Erb, 2020b, 2020c). Für ein AR-Experiment werden virtuelle Objekte in Form von dynamischen Modellen verwendet, die auf abstrakten naturwissenschaftlichen Ideen und Konzepten basieren (vgl. Teichrew & Erb, 2020d). Sie sollen virtuelle Inhalte vermitteln, die dabei helfen, das Zustandekommen realer Inhalte in Form von Beobachtungen und Messwerten nachvollziehen zu können (vgl. Teichrew & Erb, 2020e). In diesem Beitrag werden AR-Experimente vorgestellt, in denen Phänomene der Wellenphysik wie Reflexion, Beugung und Interferenz durch animierte Visualisierungen sichtbar gemacht werden. Sie sollen Lernende unterstützen, die Experimente und einhergehenden Phänomene auf ein physikalisch angemessenes Wellenkonzept zurückzuführen.

### 1.2. Schülervorstellungen zur Wellenphysik

Sowohl bei Schüler\*innen als auch bei Studierenden verbleiben nach der Behandlung von Wellen alternative Vorstellungen. Hopf und Wilhelm (2018) zählen die in mehreren Studien erfassten Lernschwierigkeiten auf (vgl. Caleon & Subramaniam, 2010; Coetzee & Imenda, 2012; Maurines, 2010; Mendel, Hemberger & Bresges, 2013; Wittmann, 2002). Mit einer entsprechenden didaktischen Strukturierung soll der Einsatz der entwickelten Modelle den folgenden Schülervorstellungen begegnen (didaktische Rekonstruktion nach Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek, 1997):

Eine wesentliche Schülervorstellung im Bereich der Wellenlehre ist, dass Wellen als materielle Objekte wahrgenommen werden. Vor allem in Bezug auf Licht ist die Betonung von Wellen als mathematisches Hilfsmittel, um die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung zu beschreiben, wichtig. Die entwickelten Wellendarstellungen basieren auf mathematischen Gleichungen, die an die reale Situation bis zu einer gewissen Grenze angepasst werden. Ihre Rolle als Hilfsmittel zur Deutung experimenteller Ergebnisse wird dadurch besonders deutlich.

Beim Phänomen der Beugung wird oft argumentiert, dass der mittlere Teil eines Lichtbündels unverändert durch die Mitte geht und nur die auf den Rand treffenden Lichtstrahlen abgelenkt werden. Dieser Vorstellung kann durch die konsequente Vermeidung des Strahlenbegriffs und der Visualisierung von Elementarwellen begegnet werden.

Da zur Interferenz oft nur die beiden Extremfälle der völligen Auslöschung, oder wenn sich zwei gleiche Wellenberge zu einem doppelten Wellenberg überlagern, visualisiert werden, fällt es Lernenden schwer zu verstehen, dass sich die Auslenkungen der beiden Wellenzüge überlagern und man durch Addition an jedem Ort die resultierende Amplitude bestimmen kann. Die gewählten Wellendarstellungen können animiert werden, sodass die Überlagerung zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Orten beobachtet werden kann.

## 2. Entwicklung

Um die Ausbreitung eines eng begrenzten Bündels elektromagnetischer Wellen mathematisch zu beschreiben, wird der Ansatz einer harmonischen ebenen Welle gewählt, die sich in  $x$ -Richtung ausbreitet. Der orts- und zeitabhängige Betrag der elektrischen Feldstärke

$$E(x, t) = E_0 \sin\left(2\pi f \left(\frac{x}{c} - t\right) + \varphi\right) \quad \{1\}$$

schwingt in  $z$ -Richtung mit der Amplitude  $E_0$ , einer Frequenz  $f = \frac{1}{T}$ , der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c = \lambda \cdot f$  und einer Phasenverschiebung  $\varphi$  zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Da für die untersuchten Phänomene lediglich das Vorhandensein einer Schwingung an bestimmten Stellen bzw. die Wellenausbreitung in bestimmte Richtungen eine Rolle spielt, wird  $E_0$  auf 1 gesetzt. Um die Phänomene in einer für AR geeigneten Größenordnung beobachten zu können, wird in den Experimenten mit Mikrowellen gearbeitet. Als Wellenlänge  $\lambda$  kann deshalb ein Wert im cm-Bereich vorgegeben werden. Die Periodendauer  $T$  wird absichtlich so gewählt, dass eine sichtbare Schwingung bzw. Wellenausbreitung visualisiert wird. Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit der modellierten Wellen entsprechen damit nicht der Wirklichkeit. Gemäß den von Stachowiak (1973) formulierten Merkmalen von Modellen betrachten wir somit

Abbildungen, die pragmatische Verkürzungen enthalten. Bei genauerer Betrachtung treten in der Lehre solche absichtlichen Abweichungen zwischen Modell und Original an vielen Stellen auf und müssen im Lernprozess explizit behandelt werden.

Gemäß dem Huygensschen Prinzip kann jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Elementarwelle betrachtet werden. Als Elementarwellen werden sich kreisförmig in der  $xy$ -Ebene ausbreitende Wellen modelliert:

$$E(x, y, t) = E_0 \sin\left(2\pi f \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{c} - t\right) + \varphi\right). \quad \{2\}$$

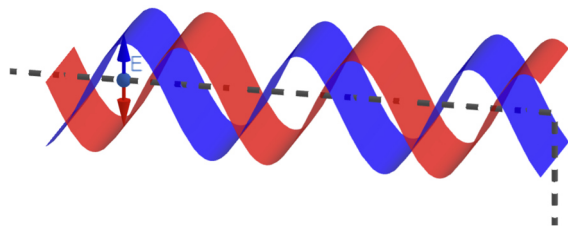
Ebene und kreisförmige Wellen sowie ihre Überlagerung dienen in den AR-Experimenten als virtuelle Objekte, die dabei helfen sollen, das Auftreten realer Inhalte zu verstehen (s. Tab.1).

	Objekte	Inhalte
<b>real</b>	Mikrowellensender, Empfänger und Hindernis	empfangene Signale als Zeigerausschläge am Messgerät
<b>virtuell</b>	ebene und kreisförmige Wellen sowie ihre Überlagerung	Schwingungen an bestimmten Stellen und Wellenausbreitung in bestimmte Richtungen

**Tab.1:** Aufzählung von realen und virtuellen Objekten und Inhalten von AR-Experimenten zur Wellenphysik

### 2.1. Modelle

Es wurden vier Modelle mit dem *GeoGebra 3D Rechner* entwickelt (<https://www.geogebra.org/3d>). Für die Visualisierung der Wellen nach {1} und {2} wird der GeoGebra-Befehl *Oberfläche* verwendet. Er erstellt für einen gegebenen  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Ausdruck eine Fläche in 3D (s. z.B. Abb.1), indem zwei Parametervariablen  $u$  und  $v$  in jeweils gegebenen Intervallen verwendet werden (s. z.B. Abb.2).



**Abb.1:** Ausschnitt der 3D Grafik-Ansicht des Modells zu stehenden Wellen

In allen Modellen nimmt die Variable *Zeit* Werte zwischen 0 und  $T$  ein. Mit der Play-Taste des zugehörigen Schiebereglers werden die Werte schrittweise abgefahren, sodass aufgrund der verwendeten Werte eine Animation der Wellenbewegung beobachtet werden kann.

Fläche

$$\text{Einlaufende} = \text{Oberfläche} \left( u, v, \sin \left( 2 \pi f \left( \frac{u - \text{Ende}}{c} - \text{Zeit} \right) \right) + \text{Höhe}, u, \text{Anfang}, \text{Ende}, v, -\frac{\text{Breite}}{2}, \frac{\text{Breite}}{2} \right)$$

$$\rightarrow \left( \sin \left( 2 \pi \frac{1}{3} \left( \frac{u - 24}{1} - 1.98 \right) \right) + 10 \right)$$

$$\text{Reflektierte} = \text{Oberfläche} \left( u, v, \sin \left( 2 \pi f \left( \frac{-(u - \text{Ende})}{c} - \text{Zeit} \right) + \pi \right) + \text{Höhe}, u, \text{Anfang}, \text{Ende}, v, -\frac{\text{Breite}}{2}, \frac{\text{Breite}}{2} \right)$$

$$\rightarrow \left( \sin \left( 2 \pi \frac{1}{3} \left( \frac{-(u - 24)}{1} - 1.98 \right) + \pi \right) + 10 \right)$$

**Abb.2:** Ausschnitt der Algebra-Ansicht des Modells zu stehenden Wellen

Der Schieberegler *Höhe* hebt die modellierten Flächen aus der xy-Ebene heraus, um sie später auf der Höhe des Senders einblenden zu können. Die Schieberegler *Anfang*, *Ende* und *Breite* grenzen die modellierten Flächen so ein, dass sie den Dimensionen der Experimente entsprechen. Außerdem kommt der *GeoGebra 3D Rechner* bei zu großen Flächen an seine Grenzen, sodass die Animation nicht mehr gleichmäßig abläuft.

Zusätzlich werden Gerüste aus grauen gestrichelten Strecken und die Position des Senders konstruiert, was die Anpassung der Modelle an die Experimentieranordnung in AR erleichtert. Mit dem Schieberegler *Ansicht* kann gewählt werden, welche modellierten Wellen gerade sichtbar sind, wobei die folgende Farbcodierung verwendet wird:

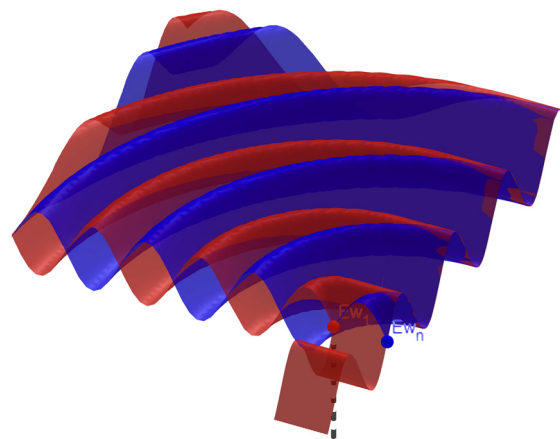
- Einzeln betrachtete Wellenanteile in Rot und Blau.
- Überlagerung von mehreren Wellenanteilen in Violett.
- Quadrat der Amplitude als Intensität in Orange.

Die vier Modelle können im Browser als GeoGebra-Buch nacheinander untersucht und angepasst werden: <https://www.geogebra.org/m/mpgscgp8>

- a) Im Modell *Stehende Wellen* wird in Rot eine ebene Welle als einlaufende Welle modelliert, die sich in x-Richtung ausbreitet. Da bei der Reflexion einer elektromagnetischen Welle an einer Metallplatte sich das elektrische Feld wie eine Seilwelle mit einem festen Ende verhält, wird in Blau eine in entgegengesetzter Richtung verlaufende Welle mit einem Phasensprung von  $\pi$  gerechnet. In Violett wird die Summe aus beiden Wellen als Überlagerung dargestellt. Die Überlagerung aus einlaufender und reflektierter Welle führt zur Ausbildung von Wellenknoten, an denen die Amplitude immer Null ist, und Wellenbäuchen, an denen die Amplitude zwischen einem Maximum und Minimum hin- und herschwingt. Der Punkt E kann verschoben werden und zeigt

auf verschiedenen Positionen die Amplituden der angezeigten Wellen als Vektorpfeil an.

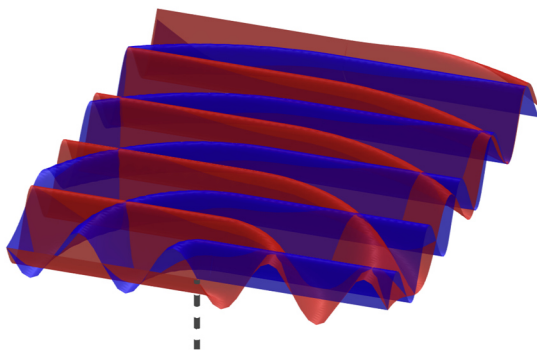
- b) Im Modell *Beugung an einer Kante* wird in Rot eine ebene Welle modelliert, die sich in x-Richtung entlang einer Kante ausbreitet. Zusätzlich wird eine kreisförmige Welle direkt an der Kante gesetzt (s.  $Ew_1$  in Abb.3), die eine Ausbreitung des Signals nach links hinter das Hindernis andeutet. Allerdings müssen weitere Elementarwellen innerhalb der Wellenfront betrachtet werden, die sich hinter das Hindernis ausbreiten. In Blau wird deshalb stellvertretend eine Kreiswelle modelliert, deren Ursprung sich eine halbe Wellenlänge rechts neben der Kante befindet (s.  $Ew_n$  in Abb.3). In Violett wird hinter dem Hindernis die Überlagerung der beiden Elementarwellen dargestellt. Die Überlagerung zeigt, dass sich die Welle zwar hinter das Hindernis ausbreitet, ihre Amplitude aber in der Nähe des Hindernisses gegen Null geht.



**Abb.3:** Ausschnitt der 3D Grafik-Ansicht des Modells zur Beugung an einer Kante

- c) Im Modell *Interferenz an Acrylblöcken* wird in Rot links von der Mitte eine ebene Welle und auf der rechten Seite eine kreisförmige Welle modelliert. In Blau wird rechts von der Mitte eine ebene

Welle und auf der linken Seite eine kreisförmige Welle modelliert (s. Abb.4). Für beiden Seiten werden Phasenverschiebungen aufgrund der Änderung der optischen Weglänge berechnet, die dadurch entsteht, dass auf die linke oder rechte Seite Acrylblöcke unterschiedlicher Länge gesetzt werden, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen verringern. Auf beiden Seiten überlagern sich demnach ebene Wellen der einen Seite und kreisförmige Wellen der anderen Seite, die sich aufgrund von Beugung in den anderen Bereich ausbreiten. Wenn beide Seiten einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge bzw. eine Phasendifferenz von  $\pi$  aufweisen, dann überlagern sich in der Mitte Wellenberge der einen Seite mit Wellentälern der anderen Seite, sodass sich beide Teile gegenseitig aufheben. In Violett kann anhand der berechneten Überlagerung nachvollzogen werden, dass das immer dann der Fall ist, wenn sich eine Seite um eine Blocklänge von 3 cm von der anderen unterscheidet: Wird nämlich für Acrylglas und Mikrowellenstrahlung ein Brechungsindex  $n$  von 1,5 angenommen, gilt für die optische Weglänge  $\Lambda$  eines 3 cm langen Blocks:  $\Lambda = l \cdot n = 3 \text{ cm} \cdot 1,5 = 4,5 \text{ cm}$ . Die optische Weglängendifferenz  $\Delta\Lambda$  von 1,5 cm führt bei einer Wellenlänge  $\lambda$  von 3 cm zu einer Phasendifferenz  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta\Lambda = \frac{2\pi}{3 \text{ cm}} \cdot 1,5 \text{ cm} = \pi$ .



**Abb.4:** Ausschnitt der 3D Grafik-Ansicht des Modells zur Interferenz an Acrylblöcken

d) Im Modell *Interferenz am Doppelspalt* werden in Rot und Blau zwei kreisförmige Wellen mit einem einstellbaren Abstand modelliert. In Violett wird die Summe aus beiden Wellen als Überlagerung dargestellt. An gewissen Orten treffen zu jedem Zeitpunkt Wellenberge auf Wellentäler, sodass die Amplitude dort null ist. Dazwischen breiten sich Wellen in verschiedene Richtungen aus. In Orange wird das Quadrat der Amplitude berechnet. Diese Fläche enthält keine negativen Anteile und zeigt die Intensität des Signals an verschiedenen Stellen an. In dieser Ansicht kann der Punkt E auf Stellen mit und ohne sichtbare Intensität um die orangene Fläche im Kreis bewegt werden.

## 2.2. Experimente

Für die Überprüfung der Modelle im Experiment wird der Mikrowellensatz von *3B Scientific* (2017) mit

einigen ergänzenden Materialien verwendet (z.B. mehrere Acrylblöcke mit einer 3 cm langen Seite). Der Mikrowellensender strahlt ein Bündel elektromagnetischer Wellen mit einer Frequenz von 9,4 GHz bzw. einer Wellenlänge von ca. 3 cm ab. Das Signal wird von einem Empfänger in Form einer Sonde oder Hornantenne empfangen und als Spannung am Messgerät ausgegeben. In den vier Teilerperimenten werden verschiedene Objekte als Hindernisse vor den Sender gestellt (s. Tab.2):

reales Hindernis	modellierte Wellen
a) mittig angeordnete Metallplatte als Reflektor führt zu stehenden Wellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einlaufende ebene Welle</li> <li>• reflektierte ebene Welle</li> <li>• Überlagerung</li> </ul>
b) versetzte Metallplatte als Beugungskante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ebene und kreisförmige Welle an der Kante</li> <li>• kreisförmige Welle neben der Kante</li> <li>• Überlagerung</li> </ul>
c) Acrylblöcke zur Erzeugung von Gangunterschieden und Interferenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ebene Welle links und kreisförmige Welle rechts</li> <li>• ebene Welle rechts und kreisförmige Welle links</li> <li>• Überlagerung</li> </ul>
d) Doppelspalt aus Metallplatten zur Vermessung von Interferenzmustern	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kreisförmige Welle links</li> <li>• kreisförmige Welle rechts</li> <li>• Überlagerung</li> <li>• Intensität</li> </ul>

**Tab.2:** Gegenüberstellung der realen Hindernisse in den vier Teilerperimenten a) bis d) und der modellierten Wellen in ihren Farben

a) Im ersten Teilerperiment zu stehenden Wellen werden an manchen Orten zwischen Sender und Reflektor Signale mit der Sonde empfangen und an manchen nicht. Das ist ein Hinweis darauf, dass elektromagnetische Strahlung reflektiert wird und es zur Ausbildung von Wellenbäuchen und -knoten kommt.

b) Im Experiment zur Beugung an einer Kante kann der kontinuierliche Abfall der Signalstärke hinter einer links der Mitte platzierten Metallplatte gemessen werden. Dazu werden mit der Hornantenne Winkel von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  abgefahren. Demnach kann sich elektromagnetische Strahlung teilweise hinter ein Hindernis ausbreiten.

c) Im Experiment zur Interferenz an Acrylblöcken wird zunächst ein Block mit einer Länge von 3 cm links der Mitte vor den Sender gestellt, sodass kein Signal gemessen werden kann. Das Hinzufügen eines zweiten Blocks rechts der Mitte bringt das Signal wieder zurück, obwohl sich jetzt scheinbar mehr Hindernisse im „Strahlengang“ befinden. Damit kann gezeigt werden, dass Acrylglas zwar durchlässig für Mikrowellenstrahlung ist, jedoch wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit



verlangsamt, sodass sich einzelne Wellenanteile mit einem Gangunterschied von einer halben Wellenlänge gegenseitig auslöschen können.

- d) Im Experiment zur Interferenz am Doppelspalt werden mehrere Intensitätsminima und -maxima an verschiedenen Stellen gemessen. Dazu werden mit der Hornantenne Winkel von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  abgefahren. Wenn elektromagnetische Strahlung auf Öffnungen in der Größenordnung der Wellenlänge gerichtet wird, findet anscheinend keine geradlinige Ausbreitung mehr statt, sondern eine Überlagerung von Wellenanteilen, die sich in alle Richtungen hinter das Hindernis ausbreiten.

### 3. Einsatz

Um die entwickelten Modelle als virtuelle Objekte direkt in die Experimente einzublenden, muss zunächst der *GeoGebra 3D Rechner* als App auf einem AR-fähigen Smartphone oder Tablet installiert werden. Über folgende Links oder entsprechende QR-Codes werden die Modelle in der App geöffnet:

- Stehende Wellen:  
<https://www.geogebra.org/3d/v9cvhbd6>
- Beugung an einer Kante:  
<https://www.geogebra.org/3d/jq8wx764>
- Interferenz an Acrylblöcken:  
<https://www.geogebra.org/3d/fhgjfbwr>
- Interferenz am Doppelspalt:  
<https://www.geogebra.org/3d/vjtcqnx>

Durch das Tippen in der 3D-Ansicht auf die AR-Taste unten rechts wird die Kamera eingeschaltet. Das Gerät sollte daraufhin etwas herumbewegt werden, sodass die Flächenerkennung stattfinden kann. Sobald auf eine Stelle der erkannten Fläche getippt wird, taucht das jeweilige Modell in der Kameraansicht auf und bleibt selbst bei Bewegung an dem zugewiesenen Ort. Es werden somit keine speziellen Marker oder passend dimensionierte Objekte für diese Art der AR benötigt. Das zieht allerdings auch die Aufgabe nach sich, das 3D-Objekt selbstständig im Raum anzuordnen. Mit zwei Fingern wird das Modell an die richtige Stelle bewegt, gedreht, größer oder kleiner gemacht (Pinch-to-Zoom). Es hat sich bewährt, Parameter des real aufgebauten Experiments wie Höhe des Senders und Abstand zum Hindernis auszumessen und noch vor dem Einblenden mit den Schieberegler einzustellen (1 Längeneinheit im Modell entspricht 1 cm im Experiment). Das aktuelle Verhältnis wird im AR-Modus unten links angezeigt und kann durch Vergrößern oder Verkleinern des Modells auf 1:1 cm eingestellt werden.

Im besten Fall arbeitet eine Person am Modell und eine Person am Experiment. Alternativ kann das Mobilgerät an einem Stativ befestigt werden, sodass die Hände zum Experimentieren frei bleiben. Sobald die virtuellen und realen Objekte aneinander ausgerichtet wurden, kann mit dem Vergleich realer und virtueller Inhalte begonnen werden. In dem verlinkten

GeoGebra-Buch kann unter jedem Modell die Durchführung des AR-Experiments in einem kurzen Video betrachtet werden:

- a) Das AR-Experiment zu stehenden Wellen zeigt, dass die Orte der modellierten Bäuche und Knoten mit den Orten, an denen Signale gemessen oder nicht gemessen werden können, ungefähr übereinstimmen (s. Abb.5).

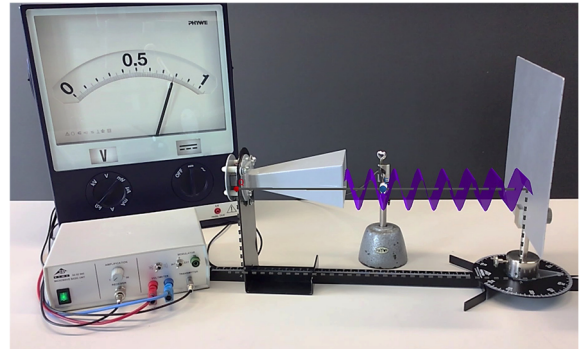


Abb.5: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments zu stehenden Wellen

- b) Das AR-Experiment zur Beugung zeigt, dass der Winkel, bei dem die Amplitude verschwindet, mit den Messungen ungefähr übereinstimmt (s. Abb.6).



Abb.6: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments zur Beugung an einer Kante

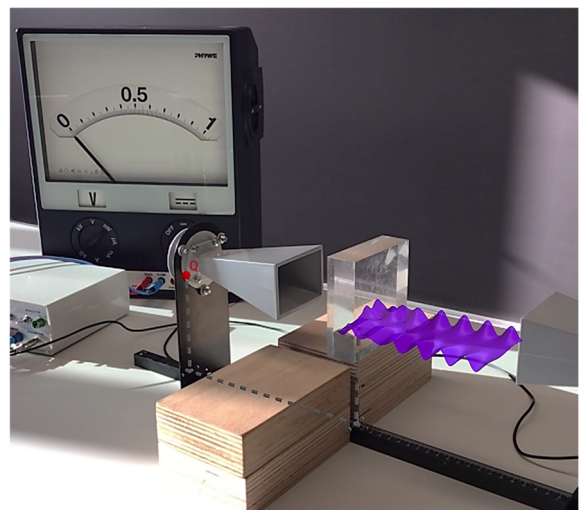
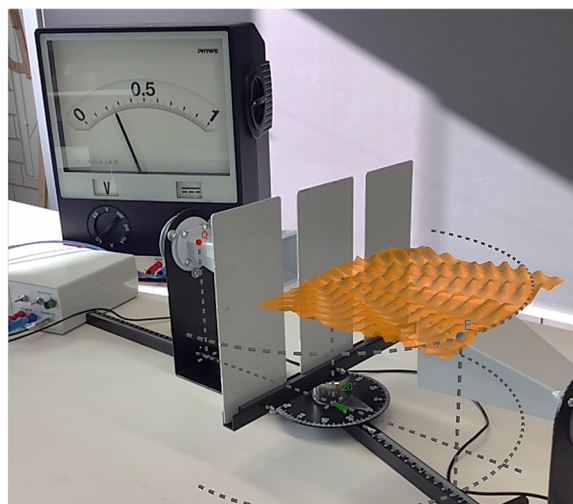


Abb.7: Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments zur Interferenz an Acrylblöcken

- c) Das AR-Experiment zur Interferenz an Acrylblöcken zeigt, dass die gegenseitige Aufhebung der beiden Seiten bei den vorhergesagten Längenunterschieden der Blöcke in der Messung eintritt (s. Abb.7).
- d) Das AR-Experiment zur Interferenz am Doppelspalt zeigt, dass die Winkel, an denen Intensitätsminima und -maxima gemessen werden, mit den im Modell für den Punkt E eingestellten Winkeln ungefähr übereinstimmen (s. Abb.8).



**Abb.8:** Bildschirmaufnahme während des AR-Experiments zur Interferenz am Doppelspalt

#### 4. Diskussion

Der Vergleich von Modell und Experiment zeigt jeweils, dass die Modellergebnisse mit den Messungen übereinstimmen. Der Güte der Übereinstimmung hängt allerdings stark davon ab, wie gut die im Modell eingestellten Parameter zu der im Experiment tatsächlich vorliegenden Realsituation passen. Vor allem die korrekte Ausrichtung der modellierten Flächen kann im ersten Moment eine Herausforderung darstellen. Es ist hilfreich, den Versuchsaufbau von verschiedenen Seiten zu betrachten und zu kontrollieren, ob die Position stimmt. Die Stabilität der virtuellen Objekte im realen Raum nimmt jedoch mit der Zeit durch viel Bewegung des Mobilgeräts und Verschiebung von realen Objekten ab, die ursprünglich als Anhaltspunkte für die Flächenerkennung dienten. Als Lösung sollte die AR-Ansicht neugestartet werden, indem für kurze Zeit in die 3D-Ansicht gewechselt wird. Außerdem kann eine gemusterte Unterlage vor dem Aufbau platziert werden, die eine schnellere und stabilere Flächenerkennung im Vergleich zum weißen Tisch ermöglicht. Der Einstieg in AR mit GeoGebra kann im Übrigen auch durch einfachere AR-Experimente erfolgen (vgl. Teichrew & Erb, 2020d).

Beim Lernen mit Modellen und Experimenten in einem gemeinsamen Problemlöseprozess liegt das Ziel eines Experiments im Vergleich der Modellhypothesen mit den Beobachtungen während eines Experiments, was in AR-Experimenten besonders deutlich

geschieht. Dadurch sollen oft mühsam eingeführte physikalische Konzepte ihre Legitimation direkt am Phänomen erhalten und eine größere Bedeutung für die Lernenden erlangen.

Gleichzeit wird der Modellcharakter des in Form von mathematischen Gleichungen und ihren Visualisierungen vorliegenden physikalischen Wissens deutlich. Die Modelle erfüllen zwar ihren Zweck, haben allerdings auch ihre Grenzen, die es zu diskutieren gilt: Die berechnete und visualisierte Wellenbewegung entspricht weder in der Animationsgeschwindigkeit noch in der Form der realen, aber unsichtbaren elektromagnetischen Strahlung. Als mentale Hilfsmittel sind sie allerdings in der Lage, Vorhersagen für reale Prozesse zu liefern.

Es wurden noch weitere Idealisierungen aus pragmatischen Gründen vorgenommen: Die Anzahl und Position der modellierten Elementarwellen wurden so gewählt, dass destruktive Interferenz in den betrachteten Bereichen vorliegt. Nach dem Huygensschen Prinzip müsste jeder Punkt einer Wellenfront als Elementarwelle betrachtet werden. Des Weiteren wurde der Wert der mit Abstand abnehmenden Intensität nicht thematisiert. Schließlich kann fern der Strahlungsachse des Senders auch der Ansatz der ebenen Wellen hinterfragt werden, sodass die Breite der Visualisierung nicht zu groß gewählt werden sollte. Nichtsdestotrotz ermöglichen die vorgenommenen Idealisierungen und Elementarisierungen, das Wellenkonzept den Lernzielen entsprechend zu visualisieren und so den Schülervorstellungen der Lernenden zu begegnen.

Eine Untersuchung, ob der Lernprozess oder das konzeptuelle Verständnis zur Wellenphysik durch AR-Experimente stärker unterstützt wird als durch herkömmliche Experimente, steht noch aus. Allerdings konnten für andere Bereiche der Physik Hinweise gefunden werden, dass AR-Experimente Lernende dabei unterstützen, reale Phänomene mit physikalischen Modellvorstellungen zu verknüpfen (vgl. Weber & Teichrew, 2021).

#### 5. Literatur

- 3B Scientific GmbH. (2017). Bedienungsanleitung - Mikrowellensatz 9,4 GHz (230 V, 50/60 Hz). Zugriff am 17.4.2021. Verfügbar unter: [https://www.3bscientific.de/product-manual/1009950\\_1009951\\_DE1.pdf](https://www.3bscientific.de/product-manual/1009950_1009951_DE1.pdf)
- Bloxham, J. (2014). Augmented Reality Learning. *ITNOW*, 56(3), 44–45. Oxford Academic.
- Caleon, I. & Subramaniam, R. (2010). Development and Application of a Three-Tier Diagnostic Test to Assess Secondary Students' Understanding of Waves. *International Journal of Science Education*, 32(7), 939–961. <https://doi.org/10.1080/09500690902890130>
- Carmigniani, J. & Furht, B. (2011). Augmented Reality: An Overview. In B. Furht (Hrsg.),

- Handbook of Augmented Reality. New York, NY: Springer New York.
- Coetzee, A. & Imenda, S. N. (2012). Alternative conceptions held by first year physics students at a South African university of technology concerning interference and diffraction of waves. *Research in Higher Education Journal*, 16(1).
- 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>
- 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, 100334.  
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>
- Hopf, M. & Wilhelm, T. (2018). Schülervorstellungen zu Feldern und Wellen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 185–208). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_9)
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *ZfDN*, 3(3), 3–18.
- Maurines, L. (2010). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*, 32(14), 1895–1926.  
<https://doi.org/10.1080/09500690903271389>
- Mendel, S., Hemberger, J. & Bresges, A. (2013). Schülervorstellungen zu Wellen - Konzeptwechsel mit Hilfe des hypothesengeleiteten Experimentierens. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Zugriff am 6.5.2021. Verfügbar unter:  
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/464/604>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020a). Lernen mit Modellen und Experimenten: Von der Beobachtung zur Erkenntnis am Beispiel des Regenbogens. *MNU*, 73(6), 481–486.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020b). How augmented reality enhances typical classroom experiments: examples from mechanics, electricity and optics. *Physics Education*, 55(6), 065029.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/abb5b9>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020c). 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. Zugriff am 9.3.2021. Verfügbar unter: <https://gdcp-ev.de/?p=3931>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020d). Augmented Reality-Experimente mit GeoGebra. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Zugriff am 15.4.2021. Verfügbar unter:  
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1043>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020e). Hauptsache Augmented? Klassifikation digitalisierter Experimentierumgebungen. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 421–426). Münster: Waxmann Verlag GmbH.  
<https://doi.org/10.31244/9783830992462>
- Weber, J. & Teichrew, A. (2021). Akzeptanzbefragung zu Augmented Reality-Experimenten auf dem Spielplatz. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Wittmann, M. C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: Analysing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24(1), 97–118.  
<https://doi.org/10.1080/09500690110066944>

### Danksagung

Wir danken für die Anregung, Visualisierungen für Mikrowellenexperimente zu entwickeln, Johanna Kerch und dem Göttinger Experimentallabor XLAB: <https://xlab-goettingen.de/physik/wellenphysik>