

PUMA : Optiklabor in der Praxis – erste Erfahrungen mit der interaktiven WebAR-Simulation

Stefan Kraus, Thomas Trefzger

Lehrstuhl für Physik & ihre Didaktik, Universität Würzburg
stefan.kraus@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Das PUMA (Physikunterricht mit Augmentierung) Optiklabor stellt eine webbasierte Augmented Reality Umgebung zur Verfügung, die Schülerinnen und Schülern neue Experimentiergelegenheiten jenseits von Realexperiment und Bildschirmsimulation schafft. Als digitales Schülerexperimentierset verwenden die Jugendlichen auf dem Tisch verteilte Papiermarker. Der Blick „durch“ Smartphone oder Tablet-PC ergänzt Geräte wie Laser, Kerzen, Schirme usw., die für den Anfangsunterricht der Optik benötigt werden. Mit diesen Gegenständen kann im dreidimensionalen Raum frei experimentiert werden. Dank des browserbasierten Ansatzes entfällt die Notwendigkeit einer Installation, was einen flexiblen Einsatz ermöglicht.

Im Schuljahr 2024/25 wird die WebApp in der Sekundarstufe I bayerischer Realschulen und Gymnasien erprobt. Begleitend füllen die Schülerinnen und Schüler Fragebögen zu technischen und affektiven Aspekten, wie auch Fachwissen aus. Trotz noch laufender Studie bieten sich bereits vielfältige Einblicke in die erhobenen Daten.

1. Motivation

In den letzten Jahren hielten verstärkt sogenannte „Schülerübungskästen“ Einzug in die Physiksammlungen. Diese ermöglichen den Schülerinnen und Schülern, vielerlei Versuche selbst durchzuführen. So sehr diese Entwicklung zu begrüßen ist, scheitert es in der Praxis aber häufig am Budget des Sachaufwandsträgers, das Equipment umfassend und in großer Stückzahl zur Verfügung zu stellen. Zudem erfordert der Einsatz der Schülerexperimente stets einen gewissen zeitlichen Aufwand, der nicht immer mit dem eng getakteten Lehrplan vereinbar ist. Darüber hinaus stehen die Materialien in der Regel nur innerhalb des Unterrichts zur Verfügung, so dass die Lernenden bei der Vor- und Nachbereitung keinen Zugriff darauf haben. Alternativ stehen zu vielen Experimenten Bildschirmsimulationen bereit, wie z. B. die HTML-Simulationen von PHET. [1] Dabei muss allerdings sehr darauf geachtet werden, die zweidimensionalen, abstrakt gehaltenen Inhalte mit der Realität zu verknüpfen. [2]

2. Konzept

Die hier vorgestellte Applikation versucht eine weitere Art der Bildschirmsimulation bereit zu stellen, welche näher am echten Experiment sein soll, ohne dessen Nachteile aufzuweisen. Ziel dabei soll keinesfalls sein, das echte Experiment zu ersetzen. Es geht darum, neue Gelegenheiten des Experimentierens zu erschließen.

Kernidee ist das Schaffen haptischer Erfahrung trotz der Durchführung eines rein digitalen Experiments. Hierbei soll keine größere Einarbeitung notwendig sein, die mit der Bedienung einer Software und ihrer Eigenheiten einhergehen. Dadurch konzentrieren sich die Schülerinnen und Schüler auf den Versuch als

solches. Ablenkungen, die mit dem eigentlichen Experiment nichts zu tun haben, sollen vermieden werden. Die Simulation umfasst die Physik hinter dem Experiment, so dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf einen bestimmten Versuchsaufbau beschränkt sind. Dies lädt zum freien Experimentieren und Ausprobieren ein. So wird beispielsweise der Laserstrahl bis zur nächsten Kollision mit einem Übergang zwischen zwei Medien unterschiedlicher optischer Dichte angezeigt, dort Brechungs- und Reflexionswinkel berechnet und der Strahl entsprechend weitergeführt.

Sehr hoher Immersionsgrad wird durch den Einsatz von Augmented Reality (AR) erreicht. Die einzig notwendige Hardware beschränkt sich auf „Marker“ zum Preis eines Blattes Papier. Die Applikation läuft plattformunabhängig auf Smartphones und Tablet-PCs aller Betriebssysteme. Um einer vorherigen Installation mit all ihren Schwierigkeiten wie Platzbedarf und Rechten auf dem mobilen Endgerät zu entgehen, wurde sie webbasiert implementiert, läuft demnach in einem beliebigen Browser nach Aufruf der URL. Sie ist aus dem Stegreif einsetzbar und steht sowohl in der Schule als auch im häuslichen Umfeld kostenlos zur Verfügung. Einzige Voraussetzung ist ein Internetzugang, wobei die übertragene Datenmenge sehr gering ist und nur zu Beginn heruntergeladen wird. Ein weiterer Mehrwert des digitalen Experiments ist die Möglichkeit, Grenzen der Physik zu verschieben. Im Gegensatz zur Realität kann hier während des Versuchs beispielsweise die Brennweite einer Linse oder der Brechungsindex eines Wasserbeckens beliebig im realistischen, wie auch im unrealistischen Bereich angepasst werden.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten Kärtchen (sogenannte „Marker“), die von der Applikation erkannt

werden. Darüber blendet die App Gegenstände wie Laser, Linsen etc. ein. Diese interagieren miteinander, so dass das Experiment rein virtuell stattfindet. Dadurch, dass die Marker auf dem Tisch hin- und hergeschoben werden können, erfährt die Nutzung eine haptische Komponente, die den Immersionsgrad deutlich fördert. Je nach Objekt werden Buttons einblendet, die die Manipulation weiterer Parameter ermöglichen.

3. Funktionsumfang

Zum Experimentieren wurde eine Reihe von ausdrucksfähigen Markern entwickelt, auf denen Gegenstände einblendet werden. Der aktuelle Entwicklungsstand umfasst folgende virtuelle Gegenstände:

- a) Erste gefahrlose Schattenversuche lassen sich mit den virtuellen Kerzen durchführen, deren Helligkeit und Flammenfarbe während des Versuchs einstellbar sind. Die eingestellte Flammenfarbe verknüpft zugleich interdisziplinäre Kenntnisse der aus der Chemie charakteristischen Flammenfärbung durch bestimmte Elemente.
- b) Sonnenauf-, Sonnenuntergang, Mondphasen, Sonnen- und Mondfinsternis sind Beispiele aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler, die eine willkommene Anwendung des Gelernten aus dem Bereich Lichtquellen und Schatten anbieten. Die Animation des Mondes um die Erde kann pausiert werden, um die Phänomene genauer zu analysieren. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu, ein solcher Modus ist später aber denkbar und würde neue Möglichkeiten eröffnen.
- c) Der Zylinder stellt ein Hindernis für Schattenexperimente mit einer oder mehreren Kerzen und deren Kern- und Halbschatten dar.
- d) Auf dem Schirm werden beleuchtete und verschattete Bereiche sichtbar. Für viele Schülerinnen und Schüler überraschend sind dabei die Halbschatten bei Versuchen mit Kerzen verschiedener Farben.
- e) Grundversuche der geometrischen Strahlenoptik benötigen einen Laserstrahl. Dieser ist in dieser Simulation auch ohne Nebel durchgehend sichtbar. Es lassen sich ein, drei oder fünf parallele Laserstrahlen einblenden. Die Laserstrahlen können in ihrer Farbe verändert werden. Zusätzlich steht weißes Licht kontinuierlichen Spektrums zur Auswahl.
- f) Ebenso steht ein einfacher Spiegel bereit, der an beliebigen Stellen in den Strahlenverlauf positioniert werden kann. Vorgesehen ist die Einblendung von Einfallslot und Winkelscheibe.
- g) Ebene Flächen erleichtern den Einstieg in die Lichtbrechung, bevor es an komplexere Systeme wie Linsen geht. In der Grundkonfiguration handelt es sich hierbei um einen Glasquader, wobei dessen Materialeigenschaften verändert werden können. Ebenso kann beeinflusst werden, ob sowohl Brechung als auch Reflexion angezeigt werden sollen oder nur eins dieser Phänomene. Die Anzeige des Einfallslots sowie eine virtuelle Winkelscheibe sind in Planung.
- h) Auch eine Sammel- und Zerstreuungslinse liegen dem virtuellen Experimentierkasten bei. Wie bereits beschrieben, lässt sich die Brennweite während des Versuchs verändern.
- i) Neben dem Quader stellt das Prisma ein interessantes Objekt zur Strahlmanipulation dar. Eine unterschiedliche Brechung je nach Wellenlänge des Einfallstrahls ist in Planung.
- j) Die meisten Experimente im Schulkontext betrachten das Verhalten eines Lichtstrahls von Luft kommend in einen Körper höherer optischer Dichte. Ein Wasserbecken mit einer Luftlinse dreht dies um und erzeugt kognitive Konflikte, die zu einer weiteren Vertiefung des physikalischen Verständnisses führen sollen.
- k) Eine weitere lebensnahe Anwendung des Gelernten ist die Abbildung im Auge. Ein Marker stellt ein halbes Auge dar, der andere Marker einen kleinen Baum, der zusätzlich ins Auge projiziert wird. Des Weiteren lässt sich eine Fehlsichtigkeit simulieren, die den Augapfel verlängert oder verkürzt. Durch eine zuschaltbare Brille und variabel einstellbare Brennweite der Brille können die Schülerinnen und Schüler die Fehlsichtigkeit korrigieren und die Projektionsebene wieder auf die Netzhaut legen.



Abb. 1: Marker und Übungskärtchen (eigene Darstellung)

4. Übungskärtchen

Die Durchführung größerer Experimente mit Messreihen und dem Erlernen ausführlicher Dokumentation ist nicht der Anspruch dieser spontan einsetzbaren Simulation. Es wurden aber 12 Übungsaufgaben in Form von Karten entwickelt, auf deren Vorderseite eine Kurzanleitung und auf der Rückseite Lösungshinweise gegeben sind. Über den aufgedruckten QR-Code gelangt man zur WebAR-Applikation. Die benötigten Marker sind leicht erkennbar. Die Karten können digital oder ausgedruckt verwendet werden. Die Themen reichen dabei von Schatten über die

Anwendung bei Mondphasen, bis hin zur Fehlsichtigkeit des Auges.

5. Forschungsinteresse

Die Art der Applikation, eine webbasierte AR-Simulation, ist in ihren Möglichkeiten bisher weitestgehend unerforscht. Daher liegt der Interessenschwerpunkt darauf, wie Lehrende und Lernende die WebApp einsetzen und bewerten. Ebenso wird untersucht, ob die Anreicherung des eigenen Unterrichts mit der WebAR-App einen Einfluss auf den Fachwissenszuwachs sowie affektiv-motivationale Faktoren hat. Dafür wird mit einer Kontrollgruppe verglichen, wobei klar ist, dass die Anzahl der Einflussfaktoren hoch ist. Zuletzt wird bewertet, wie die technische Eignung für das praktische Umfeld in Schulen ist, in denen sowohl Tablet-PCs wie auch Smartphones verschiedener Betriebssysteme genutzt werden.

6. Erster Einblick in die Praxiserprobung

Die folgenden Auswertungen beruhen auf den Daten mit Stand 25. Mai 2025. Diese entwickeln sich stetig weiter, da die Studie zum Zeitpunkt der Niederschrift dieses Beitrags noch nicht abgeschlossen war. Dennoch bieten sie bereits interessante Einblicke.

Bisher haben 599 Schülerinnen und Schüler die Vortests durchlaufen, davon knapp zwei Drittel Mädchen. Das Durchschnittsalter der Kinder beträgt 13,6 Jahre, 26 % besuchen die 7. und 74 % die 8. Klasse. Aktuell sind die Realschulen mit einem Anteil von 9,3 % noch unterrepräsentiert. In den Gymnasien besuchen 44 % der teilnehmenden Schülerinnen und Schüler den naturwissenschaftlich-technologischen Zweig, ebenso sind alle weiteren Ausbildungsrichtungen vertreten.

Lediglich 2,6 % haben kein Smartphone, die überwiegende Mehrheit gab an, bereits seit der 5. Klasse eines zu besitzen. Über die Hälfte der Jugendlichen hat noch keine Erfahrung mit Augmented Reality gemacht. Wer bereits Erfahrung besitzt, sammelte diese zumeist im privaten Bereich, aber auch im schulischen Umfeld wurde bei etwa 15 % der Schülerinnen und Schüler bereits mit AR gearbeitet.

Die technische Ausstattung der Schulen weist flächendeckendes WLAN und überwiegend Zugang zu Tablet-PCs auf (größtenteils in Form von iPad-Koffern, teils auch als 1:1-Ausstattung, so dass die Schülerinnen und Schüler dauerhaft mit einem eigenen Tablet-PC arbeiten). Es ist anzunehmen, dass durch die freiwillige Teilnahme an der Studie hierbei durchaus eine Positivauswahl getroffen wurde, wobei durch das Programm „Digitale Schule der Zukunft“ mittlerweile viele Schulen ein sehr gutes Ausstattungsniveau erreicht haben. [3]

Die Lehrkräfte, ebenfalls zu etwa zwei Dritteln weiblich, sind zwischen 28 und 57 Jahren alt und können im Mittel 13 Jahre Unterrichtserfahrung vorweisen. Ein Drittel der Lehrkräfte hat vor der Studienteilnahme noch gar keine Erfahrung mit Augmented

Reality gesammelt, etwa die Hälfte hat AR bereits privat und ein Drittel auch schon in der Schule eingesetzt.

Die teilnehmenden Klassen befinden sich größtenteils in der Praxisphase, lediglich 14 % haben bereits die Nachttestphase erreicht. Dennoch lassen sich bereits einige Beobachtungen anstellen:

Die Lehrkräfte sind völlig frei in der Einbindung der Applikation in ihren Unterricht. Sie sollen sie wie einen „digitalen Schülerübungskasten“ verwenden, den man dann aus dem Regal holt, wenn es sinnvoll erscheint. Es wurden alle Marker zu relativ ähnlichem Anteil genutzt. Der LaserBox-Marker wird in verschiedenen Kombinationen benötigt, weshalb es zu erwarten war, dass dieser höhere Nutzungszahlen hat. Das Auge mit dem Gegenstand „Blume“ wurde noch nicht so häufig genutzt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass dieses Thema als Anwendung des Gelernten erst zum Ende der Optik unterrichtet wird. Bei diesem Thema sind viele der Klassen jedoch zum Verfassungszeitpunkt dieses Artikels noch nicht angekommen.

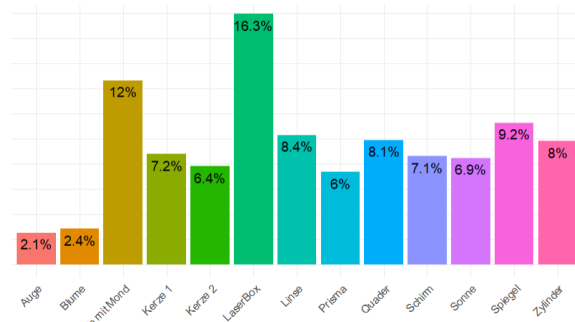


Abb. 2: Anteilige Häufigkeit der Nutzung der einzelnen Marker durch die Schülerinnen und Schüler (eigene Darstellung)

Die Lehrkräfte setzten die WebApp primär zu Beginn oder im Verlaufe eines Themas, seltener aber am Ende ein. Innerhalb einer Stunde zeigt sich eine leichte Tendenz zur Mitte, sie wird aber auch fast genauso häufig zum Einstieg oder zum Ende hin verwendet.

In fast einem Drittel der Einsätze erhofften sich die Lehrkräfte eine Erhöhung der Motivation der Schülerinnen und Schüler, in etwa einem Viertel die Auflockerung des Unterrichts durch den Methodenwechsel. Eher seltener war das Ziel die kognitive Vorentlastung eines Realexperiments.

Zumeist wurde das Optiklabor in Zusammenhang mit einem Realexperiment eingesetzt, das überwiegend in derselben Stunde stattfand. In 16 % der durchgeführten AR-Einsätze wurde jedoch ein Realexperiment ersetzt. Wenn das Realexperiment unter anderen Umständen nicht hätte stattfinden können, ist dies positiv zu sehen, da dann eine neue Experimentiergelegenheit geschaffen wurde. Unglücklich wäre es jedoch, wenn die Schülerinnen und Schüler dadurch seltener mit Realexperimenten arbeiten würden.

In gut 70 % der AR gestützten Unterrichtsstunden wurden Tablet-PCs eingesetzt, davon wiederum in knapp zwei Dritteln Leihgeräte der Schule.

Zu allen Themen der Optik wurde das Optiklabor bereits verwendet. Auffallend oft dabei zur Wiederholung der Grundlagen aus der vorangegangenen Jahrgangsstufe und bei den Themen Reflexion und Lichtbrechung.

Sehr positiv berichteten die Lehrkräfte über den web-basierten Ansatz und die damit entfallende Installation einer App. Ebenso gefiel die große Auswahl an Markern und Übungen. Die für die Studie entwickelte Onlineplattform kommt ebenso gut an wie die ansprechenden Visualisierungen insbesondere bei Erde, Sonne & Mond sowie dem Auge im Rahmen der Fehlsichtigkeit.

Vereinzelte gab es kritische Rückmeldungen zum Tracking, das je nach verwendeter Kamera etwas wackelig sein kann. Insbesondere die verschiedenen Kamerablickwinkel („field of view“) gestalteten das Experimentieren teils etwas schwieriger. Prinzipiell gilt, je weitwinkliger die Kamera ist, desto einfacher fiel es den Schülerinnen und Schülern. Als Lösung wird aktuell geprüft, ob eine Kameraauswahl implementiert werden kann, da die meisten Smartphones Kameras verschiedener Blickwinkel verbaut haben und die Standardauswahl nicht immer mit dem Weitwinkelobjektiv übereinstimmt.

7. Ausblick

Zunächst gilt es, die teilnehmenden Lehrkräfte zu unterstützen und für einen reibungslosen Ablauf zu sorgen. In den Sommerferien wird die WebApp im Sinne des Design-Based-Research weiterentwickelt und die Erfahrungen und Wünsche der Lehrkräfte implementiert. [4] Danach ergibt sich noch ein Zeitfenster zu Schuljahresbeginn, die Applikation noch einmal zu testen. Ebenso wäre dies eine Gelegenheit, die Kontrollgruppe auszubauen. In Einzelfällen werden zudem Interviews geführt, um weitere Erkenntnisse zu erlangen, die aus den eingesetzten Testinstrumenten noch nicht hervorgingen. Im Anschluss erfolgt die tiefergehende Auswertung der Daten, so dass die Ergebnisse im Frühjahr 2026 veröffentlicht werden können. Ziel wird sein, mehr über die praktische Eignung einer solchen AR-Simulation für den Physikunterricht zu erfahren, im Sinne des Design-Based-Research ein gutes Werkzeug für den Unterricht zu implementieren und Impulse für weiterführende Forschung zu skizzieren. Die Applikation in ihrer erprobten, beforschten und stetig weiterentwickelten Version soll auch über die Studie hinaus zur Verfügung gestellt werden.

8. Kontext PUMA

Der Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg unter Prof. Dr. Thomas Trefzger widmet sich in mehreren Projekten der Augmentierung von Physikunterricht. [5] Dabei steht der Einfluss von Augmented Reality auf die Lernenden im

Vordergrund. So wurden neben dem Optiklabor auch ein Magnetlabor [6] und ein Spannungslabor [7] entwickelt, die sich bereits in der Datenauswertung befinden. Bei diesen Projekten wurden native Applikationen mittels Unity implementiert, die Realexperimente graphisch und mit Zusatzinformationen unterstützen.

9. Literatur

- [1] Perkins, Katherine & Adams, Wendy & Dubson, Michael & Finkelstein, Noah & Wieman, C. & LeMaster, Ron. (2006). PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics. *The Physics Teacher*. 44. S. 18-23.
DOI: <https://doi.org/10.1119/1.2150754>
- [2] Jaakkola, T., Nurmi, S. and Veermans, K. (2011), A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts. *J. Res. Sci. Teach.*, 48: 71-93.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.20386>
- [3] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (Hrsg.). *Digitale Schule der Zukunft*. URL: <https://www.km.bayern.de/digitale-schule-der-zukunft/allgemein> (Stand 5/2025)
- [4] Reinmann, Gabi (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. In: *Unterrichtswissenschaft* 33, S. 52-69.
DOI: <https://doi.org/10.25656/01:5787>
- [5] Frank, F., Kraus, S., Kreikenbohm, A., Schwanke, H. Stolzenberger, C. Trefzger, T. (2024). Das Projekt PUMA (Physikunterricht Mit Augmentierung). In: *Beiträge zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Hannover 2023*. S. 277-279. URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1363>
- [6] Schwanke, H. Kreikenbohm, A., Trefzger T. (2024). Ein AR-Lehr-Lern-Labor zum Themengebiet (Elektro-) Magnetismus in der Sekundarstufe I. In: *Beiträge zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Hannover 2023*. 309-312.
URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1359/1578>
- [7] Stolzenberger, C., Frank, F., Trefzger, T. (2024). Theorie trifft Realexperiment - Stromkreise verstehen mit der AR-App "PUMA : Spannungslabor".
DOI: https://doi.org/10.18420/avril2024_01