

Augmented Physik *AR* im Physikunterricht

Johannes F. Lhotzky*, Frederic Schimmelpfennig⁺, Klaus Wendt*

*Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz, ⁺Institut für Informatik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Anselm-Franz-von-Bentzel-Weg 12, 55128 Mainz
lhotzky@uni-mainz.de

Kurzfassung

„Augmented Reality“ (kurz *AR*) ermöglicht die Ergänzung einer realen Umgebung mit virtuellen Objekten, Einblendungen und der Einbindung von Erläuterungen. So ist eine Simulation von Experimenten als Demonstrations- oder Schülerversuch in natürlicher Umgebung mit authentischen Repräsentationen möglich, die ohne Abstraktion auf schematische Darstellungen auskommt. Die vorgestellte Anwendung erfasst durch die Kamera eines mobilen Endgerätes reale Platzhalterkarten, die durch *AR* in echte Experimentiergelegenheiten umgewandelt werden. Als primäres Themengebiet wurde die Optik gewählt, wobei Objekte wie Laser, Spiegel, Linse oder Prisma in beliebigen Konstellationen arrangiert werden können. Die physikalischen Eigenschaften, inklusive Fehlern und Interferenzeffekten, werden korrekt modelliert. Die Anwendung soll auch in andere Themengebiete übertragen werden. Damit werden in *AR* Experimente ermöglicht, die aus finanziellen, organisatorischen oder sicherheitstechnischen Gründen ansonsten nicht von den Lernenden umgesetzt werden könnten.

1. Einführung

„Computer sind gut, Lehrer sind besser“ [1]. Mit Zitate wie diesem begegnet die Medienwelt dem derzeitigen Diskurs um die Digitalisierung im Bildungswesen. Kumulieren sollte diese leicht provokante Aussage etwa in „Gute Lehrer mit Erfahrungen im sinnvollen Einsatz digitaler Medien sind die Besten!“. Durch Innovationen im Bereich von Hard- und Software entstehen neue Zugänge und Möglichkeiten des Wissenstransports, die eine kompetente Lehrkraft sehr nutzbringend in das Unterrichtsgeschehen einbringen kann. Ebenso wie in anderen Feldern der Gesellschaft suchen und finden digitale Medien und Anwendungen damit auch im Bildungsbereich durchaus berechtigt und gleichermaßen zielführend ihren Platz.

Augmented Reality (*AR*) stellt eine vergleichsweise junge Form von digitalen Medieninhalten dar und gewinnt aktuell aufgrund der anwachsenden Rechen- und Grafikleistung kostengünstiger mobiler Endgeräte zunehmend an Bedeutung. Unter dem Begriff *AR* wird dabei die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung in Echtzeit und im dreidimensionalen Raum verstanden (vgl. [2, 3]). Reale Begebenheiten werden durch Visualisierungen, Animationen und Informationstexte mittels *AR* ergänzt und aufgewertet. Hierbei nutzt eine häufig gewählte Umsetzung den Ansatz, die reale Welt mittels der in den Geräten integrierten Kamerasysteme aufzuzeichnen und in der *AR*-Anwendung durch die gewünschten Informationen und Abbildungen zu ergänzen und aufzuwerten. *AR* ist dabei von Virtual Reality (*VR*) dahingehend abzugrenzen, dass bei *VR* die reale Welt vollständig von einer virtuellen, simulierten Umgebung ersetzt wird. Die Chancen der *AR*-Technik liegen hingegen in der direkten Verschmelzung von realen Sinneseindrücken und Interaktionsmöglich-

keiten mit Erweiterungen durch alle Formen digitaler Repräsentationen. Die digitalen Medien, etwa Tablets, Smartphones oder Medienbrillen (bspw. Microsoft HoloLens), blenden dazu zur Augmentation gewählte Inhalte gezielt und wohlangepasst in die Realität ein.

1.1. Überblick: *AR* in Lehre und Unterricht

Multimediaanwendungen auf digitalen Medien können die Nutzerin bzw. den Nutzer über unterschiedliche Sinneskanäle erreichen. Durch die direkte Interaktionsmöglichkeit mit den *AR*-Anwendungen werden deren Nutzerinnen und Nutzer dazu animiert, aktiv am Lernprozess teilzunehmen (vgl. [4], S. 405). Dabei wird von echter Interaktivität gesprochen, wenn die Lernenden die jeweilige Anwendung nicht nur nutzen, sondern auch individuelle Komponenten modifizieren und im Experimentierprozess dynamisch anordnen können (vgl. [5]). Innerhalb der Lehre beginnen neben den vielen bereits etablierten Apps und Lernprogrammen entsprechende *AR*-Anwendungen aktuell gerade erste ernstzunehmende Einsatzmöglichkeiten zu finden. In einigen Schulbüchern werden mit entsprechender Software zweidimensionale Darstellungen in simulierte und interaktive Abbildungen umgewandelt (bspw. Klett Augmented). Mit verfügbarer kommerzieller Software ist das Erstellen eigener *AR*-Anwendungen bereits für Lehrkräfte möglich, was aber einige Erfahrungen im Umgang mit den Medien voraussetzt (vgl. bspw. Aurasma, Layar, Reality Composer und Augment). Eine typische Umsetzung stellt dabei die Einfügung von erläuternden Informationen und wichtigen Messgrößen in reale Versuchsaufbauten dar. Dazu werden in mitunter hochkomplexe Versuchsaufbauten Einblendungen eingespielt, die den Lernenden direkte Anleitung und Feedback zu Durchführung und

Auswertung des Experiments geben (vgl. [6, 7]). Bei diesen Realisierungen sind jedoch im Allgemeinen die Interaktionsmöglichkeiten innerhalb des Mediums und damit auch die Optionen zur Variation des Experimentiervorgangs stark auf ein explizites Ziel sowie dessen Erreichen ausgerichtet. Bei dem hier vorgestellten Konzept von *AR.X* wurde hingegen die Ermöglichung wirklich freien Experimentierens und Interagierens innerhalb der „(Erweiterten-)Realität“ in den Vordergrund der Entwicklung gestellt.

2. Was sind Augmented Reality Experimente?

AR.X (Augmented Reality Experiments) stellen einen leistungsfähigen und innovativen Ansatz dar, um das Potential von *AR* in Lehre und Unterricht zu nutzen. Mit *AR.X* wird die Möglichkeit geschaffen, eine reale Umgebung authentisch mit virtuellen Repräsentationen von Experimentiergeräten zu erweitern, mit diesen Experimente durchzuführen und physikalische Phänomene qualitativ wie auch quantitativ zu untersuchen. Dazu werden sogenannte Marker-Karten (auch als Trigger- oder Target-Karten bezeichnet) auf einem beliebigen Untergrund platziert und durch die Kamera eines Smartphones oder Tablets kontinuierlich eingelesen (s. Abb. 1). Die *AR.X*-App ergänzt an den Positionen der Karten virtuelle Experimentiergeräte oder -komponenten, sodass auf dem Bildschirm eine Kombination der realen Umgebung mit den in diese hinein integrierten virtuellen Experimentiergeräten dargestellt wird. Translationen bzw. Rotationen der Karten in der realen Welt werden direkt auf die künstlich ergänzten Experimentiergeräte und deren Position und Ausrichtung im Raum übertragen. Um weitergehende Einstellmöglichkeiten der einzelnen Komponenten und Apparate zu erhalten, können diese zusätzlich individuell per Touch-Eingabe auf dem digitalen Medium selektiert und dann dort justiert werden. Auf diese Art und Weise können bspw. Lichtquellen ein- und ausgeschaltet, die Orientierung einer Spiegelfläche präzise justiert oder die Brechkraft einer Linse angepasst werden.

Um mit den ergänzten Experimentiergeräten physikalisch korrekt arbeiten zu können, wird die zugrundeliegende Physik vollständig durch die App simuliert und entsprechend visualisiert (z.B. über optische Strahlengänge, spektrale Aufspaltung oder Interferenzmuster). Von rein virtuellen Experimentieranwendungen (bspw. [8, 9]) unterscheidet sich die Arbeit mit *AR.X* durch die Möglichkeit des haptischen „Begreifens“ einer Versuchsanordnung bei gleichzeitiger Beobachtung der Auswirkung in der Simulation. Das Betrachten am Bildschirm des digitalen Mediums eröffnet dabei den Zugang in die Welt physikalischer Phänomene und übernimmt damit für die Lernenden die gleiche Rolle wie bspw. der Blick durch eine Sicherheitsscheibe auf eine Versuchsanordnung im Chemieunterricht. Die bewusste Vermeidung komplizierter Nutzeroberflächen lenkt die Aufmerksamkeit auf das Wichtige – das Experiment selbst.



Abb.1: *AR* im Einsatz. Einlesen der Marker-Karten und direkte Übertragung in die *AR.X*-App

Im Gegensatz zu den meisten anderen Ansätzen der Nutzung von *AR*, welche den Fokus auf die Einblendung wichtiger Zusatzinformationen an einem realen und ggf. komplizierten voraufgebauten Versuchsaufbau legen, sind für die Arbeit mit *AR.X* lediglich ein Smartphone oder Tablet sowie die auf Papier ausgedruckten Marker-Karten nötig. Diese verblüffende Einfachheit animiert Lehrende und Lernende in gleichem Maße und verbindet ein hohes „Spielpotential“ im Umgang mit dem Material mit einem besonders intensiven Lernprozess. Die Möglichkeit zur beliebigen Kombination der genutzten Experimentiergeräte in *AR.X* schafft dazu einen besonderen persönlichen Freiraum zum Forschen und Entdecken und bietet zudem eine große Vielfalt in der möglichen Wahl und Ausstattung der verschiedenen Experimente und Aufbauten. Einen Themenbereich, welcher mit diesem Konzept besonders gut bearbeitet werden kann, stellt die Optik dar. Als prototypische Anwendung sowie zu Test und Demonstration der Möglichkeiten wurde die aktuelle Entwicklung von *AR.X* daher auf Experimentiergeräte der geometrischen Optik und Wellenoptik beschränkt.

Die Software von *AR.X* nutzt die zur Konstruktion von Multimediaanwendungen weit verbreitete *Unity-Engine* [10]. Sie erlaubt eine von der Zielplattform unabhängige Entwicklung und Veröffentlichung, sodass die gesamte Palette auf aktuellen und auch zukünftigen mobilen Endgeräten unterstützt wird. Zur Umsetzung der *AR*-Features wird zudem die Programmierbibliothek *Vuforia augmented reality software development kit* [11] genutzt.

2.1. Einsatzszenarien und Experimente

Beim Arbeiten mit *AR.X* stehen wie im klassischen physikalischen Unterricht das offene Laborieren und Experimentieren mit den Geräten und Komponenten des Versuchsaufbaus im Zentrum. Die Anwendung stellt damit einen spezifisch forschend-entwickelnden Lernansatz dar [12], um Lehrenden und Lernenden neue vertiefte Möglichkeiten und Methoden zur Wissensvermittlung bzw. zum Wissensaufbau zu bieten. Die in der *AR.X*-App angebotenen Experimente zielen konkret auf Themengebiete und Versuche ab, die im Schulalltag aus unterschiedlichen Gründen nicht

oder nur erschwert experimentell erarbeitet werden können. Dies betrifft gleichermaßen das traditionelle von der Lehrperson vorgeführte Demonstrationsexperiment wie auch die didaktisch als deutlich wertvoller eingestuft eigenständigen Schülerversuche [13]. Dabei spielt neben der oftmals nicht gewährleisteten Verfügbarkeit der Experimentiermaterialien, etwa aus Aufwands- oder ökonomischen Gründen, heute besonders das Gefahrenpotential, z.B. durch die Verwendung von Laserstrahlung, Hochspannung oder Radioaktivität, eine zentrale Rolle. Durch *AR.X* wird es den Schülerinnen und Schülern in Klassenstärke ermöglicht, zeitgleich und völlig gefahrlos im „normalen“ Unterricht zu experimentieren und das Unterrichtsgeschehen durch eigene praktische Erfahrungen zu „begreifen“. Die Anwendung schafft eine sichere und flexibel einsetzbare Lernumgebung, in der jede Schülerin und jeder Schüler entweder individuell oder kooperativ als Teil einer Kleingruppe arbeiten kann. Methodisch kann der Einsatz der *AR.X* dabei gleichermaßen als Einstieg zur forschenden Vorbereitung einer neuen Thematik, zur gezielten Untersuchung eines Phänomens in der Erarbeitungsphase oder aber auch zur Verständnisvertiefung in der Nachbearbeitungs- und Sicherungsphase Anwendung finden. Dazu ist aber von unserer Seite hinzuzufügen, dass *AR.X* nach Möglichkeit keine Realexperimente ersetzen, sondern immer nur ergänzend eingesetzt werden sollen, da natürlich die wichtige haptische Erfahrung am echten Experiment in Augmented Reality nicht in analoger Weise umgesetzt werden kann.

2.2. Vorstellung konkreter Beispiele

Prototypisch sollen nachfolgend zwei Experimentierumgebungen aus dem bisher zur Verfügung stehenden Themenbereich der Optik vorgestellt werden. Diese betreffen konkret jeweils ein Beispiel aus der geometrischen Optik (Sekundarstufe I) sowie aus der Wellenoptik (Sekundarstufe II). Allgemein ist bei *AR.X* die Anzahl der zum Einsatz kommenden Marker-Karten frei wählbar und in vernünftigen Grenzen quasi unbegrenzt. Darüber hinaus sind diese im Raum frei positionierbar und können zu einer Vielzahl verschiedener Experimentaufbauten angeordnet werden.

2.3. Brechung an Grenzflächen optischer Medien

Im Optikunterricht fällt den Eigenschaften optischer Linsen eine zentrale Bedeutung zu: Ihre Untersuchung gilt als unverzichtbares Schlüsselexperiment. Mithilfe der bei *AR.X* verfügbaren Laserstrahlenbox, aus der virtuell fünf parallele Laserstrahlen emittiert werden, können die Bündelungseigenschaft einer Sammellinse sowohl qualitativ als auch quantitativ beobachtet sowie Linsenfehler wie die sphärische Aberration untersucht werden (s. Abb. 2). Dazu werden einfach die entsprechenden Karten „Laserstrahlenbox“ bzw. „Sammellinse“ in geeignetem Abstand und Ausrichtung auf dem Tisch platziert. Für qualitative Untersuchungen, etwa zur Brennweite, kann optional ein Maßstab bzw. ein zweidimensionales Gitter ausgelegt oder der Einfachheit halber eingeblendet

werden (s. Abb. 2). Kontrastierend dazu können zum vollständigen Verständnis des Phänomens der Brechung Experimente an einer Zerstreuungslinse durchgeführt werden.

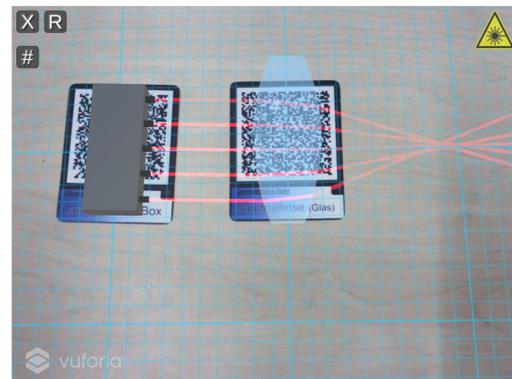


Abb.2: Strahlengang in einer Sammellinse

An den Standardkomponenten wie Sammellinse oder Zerstreuungslinse kann am Touchdisplay des verwendeten Endgeräts die Brechkraft mithilfe eines Schiebereglers eingestellt werden. Zusätzlich stellt die App auch eher ungewöhnliche, aber besonders spannende und lehrreiche Experimentierumgebungen zur Verfügung. Als Beispiel ist eine hohle, luftgefüllte Sammellinse in einem Wasserbecken zu nennen, mit der interessante kognitive Konflikte zu ihrem Verhalten als Zerstreuungslinse erforscht werden können (s. Abb. 3).

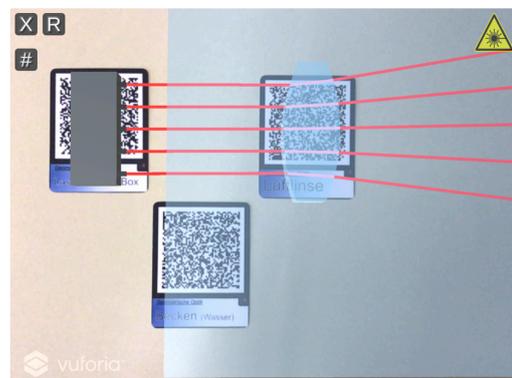


Abb.3: Strahlengang in einer luftgefüllten Sammellinse im Wasserbecken

2.4. Dispersion am Prisma

Als besonderer Bonus, der deutlich über die Möglichkeiten des Realexperiments hinausgeht, kann in der App *AR.X* die Lichtquelle „Laser“ nicht nur traditionell monochromatisches Licht emittieren, typischerweise etwa rot oder grün (einstellbar über das User-Interface), sondern auch in Form eines sogenannten Superkontinuums betrieben werden. Dies entspricht einer Weißlichtstrahlungsquelle, wie sie in der Realität heute über nichtlineare Prozesse z.B. in einem aufwändigen Frequenzkamm erzeugt werden kann (vgl. [14]). Mit dieser Einstellung kann das Auftreten von Dispersionseffekten an einem Prisma bzw. deren Abwesenheit bei Transmission durch eine planparallele Platte beobachtet werden. Qualitativ können dabei die

Abhängigkeit der Wellenlänge und der Lichtbrechung untersucht und damit das Snelliussche Brechungsgesetz experimentell überprüft werden. In Kombination mit Linsen ergeben sich dabei spannende Experimente zur chromatischen Aberration (s. Abb. 4).



Abb.4: Dispersion an einem Prisma

2.5. Interferenz

Bezugnehmend auf die Welleneigenschaften des Lichts bietet die in *ARX* bereitgestellte Experimentierumgebung die Möglichkeit, Interferenzphänomene zu studieren. Mit wenigen Marker-Karten kann der Aufbau verschiedener Interferometertypen, wie etwa des bekannten Michelson-Interferometers (vgl. [15]) oder des in der Quantenoptik weit verbreiteten Mach-Zehnder-Interferometers (vgl. [16]) bis hin zum Sagnac-Interferometer des Laserkreisels (vgl. [17]), erstellt werden. Durch die richtige Justage des Strahlengangs und der optischen Komponenten über die Positionierung der Marker-Karten und ihre präzise Feinausrichtung im User-Interface ist es möglich, ein authentisches Interferenzbild auf dem Screen zu erzeugen und z.B. die Auswirkung der Variation der Länge eines Arms des Interferometers oder der Einbringung eines Mediums auf das Interferenzbild detailliert zu untersuchen (s. Abb. 5).

Die innovative Steuerung des Versuchs über die Repräsentanten von bspw. Spiegeln oder Strahlteilern auf dem Display rückt den in der Optik entscheidenden Aspekt der Feinjustage in den Mittelpunkt des Experimentes.

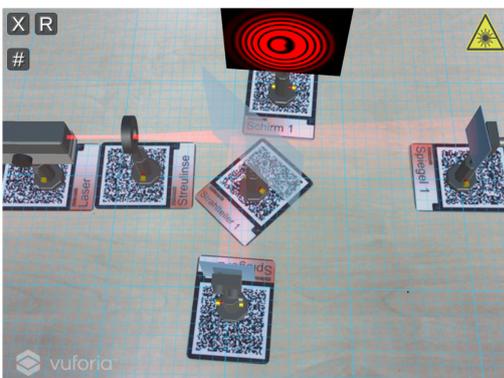


Abb.5: Interferenz im Michelson-Interferometer

Die Lernenden machen realitätsnahe Experimentier-erfahrungen, da analog zum realen Interferenzexperiment die genaue Ausrichtung und Justage der optischen Elemente den Hauptbestandteil des Experimentierens darstellen und über Erfolg oder Misserfolg entscheiden. Die optische Dichte innerhalb eines Teilstrahls kann dabei variiert werden, indem die Marker-Karte „Block aus Glas“ in einen Teilstrahl eingebracht wird. Als spannende Zukunftsperspektive wird aktuell eine Implementierung von Polarisationsfiltern angestrebt, um Experimente rund um die Thematik des „Quantenradierers“ durchführen zu können (vgl. [18]).

2.6. Details zur Simulation der Optik

Zur Computersimulation bietet sich der Bereich der Optik ganz besonders an, da sich die optischen Komponenten als Experimentiergeräte gegenseitig nicht beeinflussen und im Allgemeinen auch nur sehr wenig intrinsische Parameter aufweisen – sie befinden sich also stets am Ort der Marker-Karten und können in der Repräsentation am Display mit wenigen einfachen Reglern angesprochen werden. Die physikalische Interaktion zwischen verschiedenen Apparaturkomponenten findet ausschließlich durch die Übertragung von Lichtstrahlen statt, die die Komponenten und deren Aktion nicht beeinflussen.

Für die Gewährleistung einer universellen Kombination der bereitgestellten Experimentiermöglichkeiten wurde ein grundlegendes Modell für Strahlengänge erstellt und in die App implementiert, welches gleichermaßen die Aspekte der geometrischen Optik wie auch der Wellenoptik abbildet. Generell teilen sich die Experimentiergeräte der Optik in *ARX* in Lichtquellen und in mit Licht interagierende Objekte auf. In der technischen Umsetzung ändern mit Licht interagierende Objekte grundlegende physikalische Eigenschaften des Lichts bzw. dessen Strahlenganges bei der lokalen Wechselwirkung. Zu den in der App verwalteten Eigenschaften einzelner Strahlengangsabschnitte zählen bspw. Richtung, Ausdehnung, Divergenz und Wellenlänge des Strahlenbündels. Zusätzlich werden auch komplexere Eigenschaften wie die Summe des optischen Weges, den das Licht im Strahlengang an dem jeweiligen Punkt der Geräte-Interaktion zurückgelegt hat, berechnet. Auf diese Weise können neben geometrischen Effekten zu Brechung auch chromatische Phänomene der Dispersion sowie die Welleneigenschaft des Lichts mehrerer Strahlen in Abhängigkeit von dessen Fokussierungseigenschaften für die Entstehung von Interferenzerscheinungen in perfekter Reproduktion der zugrundeliegenden physikalischen Phänomene berechnet und dargestellt werden.

Um die „Live“-Aktualisierung des Experimentiergeschehens nahezu latenzfrei und mit einem beherrschbaren Rechenaufwand auf den mobilen Endgeräten, also ohne wesentliche Verzögerung zwischen Interaktion und Darstellung, zu ermöglichen, werden in dem Simulations- und Berechnungsprozess

spezifische numerische Näherungen (z.B. bei der Berechnung der Dispersionsgleichung) verwendet. Hierbei wurde immer sichergestellt, dass deren Auswirkungen für die quantitative Anwendung in einem vernünftigen Genauigkeitsrahmen nicht signifikant sind.

3. Einsatzmöglichkeiten im Unterricht

Die Einsatzmöglichkeiten der *AR.X*-App im Unterricht entsprechen denjenigen realer Versuche und gehen über deren Möglichkeit in Hinblick auf Variationsvielfalt und Präzision hinaus. Analog dem Realversuch profitieren *AR.X* damit von dem großen didaktischen Potential eigenständig durchgeführter Schülerexperimente bzw. kompetent moderierter und präsentierter Demonstrationsexperimente der Lehrkraft. Damit steht mit *AR.X* ein jederzeit verfügbares und einfach bedienbares Unterrichtsmedium zur Wissensvermittlung zur Verfügung, das sich als Bonus, Ergänzung (und nur in gut begründeten Ausnahmefällen als Ersatz) zum klassischen Experiment in den Unterricht einbinden lässt. Durch die damit möglich werdende deutlich vergrößerte Flexibilität und Verfügbarkeit von Visualisierungen physikalischer Inhalte erweitern *AR.X* das Spektrum eines forschend-entwickelnd und speziell experimentell orientierten physikalischen Unterrichts. Schülerinnen und Schüler können mit den digitalen Experimenten erste Erfahrungen im Experimentieren sammeln, die frei von Berührungängsten, Furcht vor eigener Gefährdung oder der möglichen Beschädigung von Experimentiermaterialien sind. Diese positive Erfahrung dient auch als optimale Vorbereitung für das spätere Arbeiten an Realexperimenten.

3.1. Über die Grenzen des Realexperiments hinaus

Durch die Verwendung der erweiterten Realität bietet die *AR.X*-App besondere experimentelle Möglichkeiten, die weit über die Grenzen des Realexperiments hinausgehen. Die Nutzerinnen bzw. Nutzer sind in der Lage, Szenarien auszuprobieren, die in der Realität so nicht umsetzbar sind. Als konkretes Beispiel wurde bereits die Option der frei einstellbaren Wellenlänge des Lasers bis hin zur Erzeugung von weißem Licht genannt. Gleichmaßen sind eine Überzeichnung der beobachteten optischen Phänomene, z.B. durch das Einstellen des Brechungsindex‘ auf realitätsfern überhöhte Werte oder durch Inversion (an der Luftlinse im Wasserbecken), und ähnliche Ansätze gut vorstellbar und umsetzbar. In einem kreativen Unterrichtsgeschehen ergeben sich hierbei ganz neue Chancen und Möglichkeiten, um entdeckendes Lernen voranzutreiben. Die Schülerinnen und Schüler erhalten großen Freiraum, das Forschen zu erproben und dabei Selbstsicherheit und Kreativität zu entwickeln. Selbst der auf den ersten Blick negativ empfundene Umstand, dass es sich in *AR.X* stets um eine Simulation der Realität und der darin sich abspielenden physikalischen Prozesse handelt, besitzt anregendes Potential zur Problemorientierung. Da ja auch die kritische Reflexion über die eingesetzten digitalen

Medien und über die Relevanz der Inhalte im Unterricht stets eine Rolle spielen sollte, liegt es nahe, dass die Lernenden unerwartete Ergebnisse des Programms in Frage stellen, detailliert reflektieren und dabei physikalisch sinnvoll und tiefgehend argumentieren.

3.2. Unterstützte Plattformen

Bei der Konzeption und Entwicklung wurde großer Wert daraufgelegt, dass die Anwendung *AR.X* auf der gesamten Palette von gängigen mobilen Endgeräten mit den Betriebssystemen iOS und Android nutzbar ist. Aufgrund der weiten Verbreitung dieser Stores und der dadurch einfachen Verfügbarkeit wurde sich auf diese Plattformen konzentriert. Eine Unterstützung bisher wenig verbreiteter Medien, wie etwa Datenbrillen (z.B. Hololens), wurde aufgrund der geringen Verfügbarkeit und hohen Anschaffungskosten bisher nicht vorgesehen. *AR.X* orientieren sich generell daran, einer möglichst breiten Palette von Benutzerinnen und Benutzern in Schule und Hochschule einen von der Verfügbarkeit der Medien quasi uneingeschränkten konkreten und problemlosen Zugang zu bieten. Darüber hinaus möchte die Anwendung die breite Masse von Schülerinnen und Schülern auch in „Bring Your Own Device“-Ansätzen über Smartphones oder Tablets erreichen.

3.3. Verfügbarkeit

Es ist geplant, die *AR.X*-App über die vorgenannten Stores für Smartphone und Tablet zur Verfügung zu stellen. Das Installieren ist somit auch auf privaten Endgeräten der Schülerinnen und Schüler möglich und zulässig sowie bei anderen Apps automatisiert und schnell durchführbar. Die Marker-Karten können dann von einer Homepage heruntergeladen sowie ausgedruckt werden und sind somit auch im Klassensatz verfügbar.

4. Fazit und Ausblick

Die vorgestellte *AR.X*-App ermöglicht eine konkrete frei verfügbare sowie breit einsetzbare Anwendung für den Schulunterricht mit hohem didaktischen Potential, aktuell spezifiziert im Bereich der geometrischen Optik und der Wellenoptik. Beim Einsatz im Unterricht steht dabei nicht der im Eingangszitat beschriebene „Computer“ für die Gestaltung des Unterrichts im Mittelpunkt, das System hingegen passt sich an das Unterrichtskonzept der Lehrperson mit verschiedensten Einsatz- und Schwierigkeitsstufen an. Aktuell umgesetzt ist das Konzept mit vielfältigen Experimentiermöglichkeiten im Themenbereich Optik. Die *AR.X*-App steht dabei noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung. Neben den aktuell vorhandenen Schüler- und Demonstrationsexperimenten sind etwa die Implementierung von Hilfskarten für differenzierten Unterricht sowie die Integration eines speziellen „Lehrer-/Präsentationsmodus“ angestrebt, in dem neben großflächiger und eindrucksvoller Darstellung auch automatische Justagemöglichkeiten und selbstständige Experimentabläufe z.B. als Anleitungsfilm

vorgesehen sind. Neben dem Thema „Optik“ sind perspektivisch auch andere Themenbereiche für die Umsetzung mit *AR.X* in Vorbereitung. Hier ist die Einbindung der *AR*-Technologie etwa im Bereich von physikalischen Inhalten aus der Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik, Atom- und Teilchenphysik bis hin zu Ingenieurwissenschaften gut vorstellbar.

Hinweise auf eine breite Motivation und hohe Akzeptanz von Lernenden mit der *AR.X*-App konnten wir in einer ersten rein quantitativen Evaluation in verschiedenen Klassen umliegender Gymnasien erhalten. Diese wurden bisher aber weder empirisch noch statistisch belastend ausgewertet. Abschließend möchten wir daher nur einige ausgewählte Schülerantworten aufführen. Die Lernenden einer achten Jahrgangsstufe eines Mainzer Gymnasiums bestätigen in diesem Zusammenhang, „[dass] man so viel und so gut ausprobieren konnte“ und dass es dabei „viele Möglichkeiten gibt“. Die Schülerinnen und Schüler urteilen auch, „[dass] man sich besser vorstellen kann, wie es aussehen würde“, wenn die Möglichkeit eines Realexperimentes bestünde. Dabei unterstreichen sie als Vorzug der App das „[I]eichte Bedienen: [M]an lernt dadurch viel“. Letztlich stellen sie „die Idee, weil man so selber etwas experimentieren kann“ als etwas besonders Positives an der Anwendung heraus, was im aktuellen Physikunterricht leider doch immer noch viel zu kurz zu kommen scheint.

5. Literatur

- [1] M. Grohé. *Computer sind gut, Lehrer sind besser*. 2019. URL: www.sueddeutsche.de/kolumne/digitalisierung-in-der-schule-computer-sind-gut-lehrer-sind-besser-1.3692506 (besucht am 03. 10. 2017).
- [2] R. Azuma. „A Survey of Augmented Reality“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6, 355-385. (1997).
- [3] M. Peschel u.a. „Augmented Reality (AR) als Werkzeug im naturwissenschaftlichen Unterricht“. In: (10. Apr. 2020). URL: http://https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_940_Peschel.pdf.
- [4] E. Kircher, R. Girwidz und P. Häußler. *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, (2014).
- [5] L. Issing und R. Strzebkowski. „Lernen mit Multimedia aus psychologisch-didaktischer Sicht“. In: *DPG - Fachverband Didaktik der Physik, Didaktik der Physik – Vorträge Physikertagung* (1997).
- [6] S. Kapp u. a. „Augmenting Kirchhoff’s laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students“. In: *The Physics Teacher* 57, 52 (2019).
- [7] M. Strzys u. a. „Physics holo. lab learning experience: Using smartglasses for augmented reality labwork to foster the concepts of heat conduction“. In: *European Journal of Physics* 39.3 (2018).
- [8] W. Lindlahr. „Virtual-Reality-Experimente für Interaktive Tafeln und Tablets“. In: *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Joachim Herz Stiftung Verlag, (2014).
- [9] Homepage des Fachverband für Strahlenschutz e.V. <https://www.fs-ev.org/home> (Stand: 4/2020).
- [10] Homepage Unity Technologies. *Unity3D Engine*. URL: <https://unity.com/de>. (Stand: 3/2020).
- [11] Homepage PTC. *Vuforia Engine*. URL: <https://developer.vuforia.com/>.
- [12] D. Höttecke, „Forschend-entdeckender Physikunterricht“ In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 119, 4 (2010).
- [13] R. Duit, M. Tesch, “On the role of the experiment in science teaching and learning – Visions and the reality of instructional practice,“ In: M. Kalogiannakis, D. Stavrou & P. Michaelidis (Eds.) *Proceedings of the 7th International Conference on Hands-on Science 2010, Rethymno-Crete*, ISBN 978-989-95095-6-6, 17 (2010).
- [14] F. Haake, T. Udem, Der lange Weg zur optischen Uhr“, *Physik in unserer Zeit* 36(6), 258 (2005).
- [15] K.-P. Möllmann, Michael Vollmer „Interferometrie auf dem Küchentisch. Wellenoptik“, *Physik in unserer Zeit* 39(1), 30 (2008).
- [16] S. Leutner, R. Scholz und G. Friege. „Einsatz eines Mach-Zehnder-Interferometers mit abgeschwächter Lichtquelle für einen experimentellen Einstieg in die Quantenmechanik“. In: *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2010).
- [17] S. Heusler. „Ein elementarer Zugang zum Sagnac-Effekt“. In: *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2011).
- [18] KIT. *Das Mach-Zehnder-Interferometer als Analogieversuch zum Quantenradierer*. 8. Apr. 2020 URL: <http://psi.physik.kit.edu/52.php>.