

Physikalische Modelle erfahrbar machen

- Mixed Reality im Praktikum -

Paul Schlummer*, **Adrian Abazi[†]**, **Rasmus Borkamp[°]**, **Jonas Lauströer[°]**, **Wolfram Pernice[†]**,
Carsten Schuck[†], **Reinhard Schulz-Schaeffer[°]**, **Stefan Heusler*** und **Daniel Laumann***

* Institut für Didaktik der Physik, WWU Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster

[†]Center for Nanotechnology, WWU Münster, Heisenbergstr. 11, 48149 Münster

[°]Department Design, HAW Hamburg, Finkenau 35, 22081 Hamburg

paul.schlummer@wwu.de, Adrian.abazi@wwu.de, mail@rasmusborkamp.de, jonas.laustroeer@haw-hamburg.de, wolfram.pernice@wwu.de, carsten.schuck@wwu.de, reinhard.schulz-schaeffer@haw-hamburg.de, stefan.heusler@wwu.de, daniel.laumann@wwu.de

Kurzfassung

In der Regel arbeiten Studierende in den Anfängerpraktika an didaktisch aufbereiteten Experimenten, die einen starken Bezug zu physikalischen Modellen aufweisen. Mit den üblicherweise zur Verfügung stehenden Materialien ist es Lernenden kaum möglich, das Experiment mit der Modellebene unmittelbar in Verbindung zu setzen, da diese keinen direkten Bezug zueinander zu haben scheinen.

Die Erweiterung von Praktikumsversuchen um Elemente der Mixed-Reality ermöglicht eine engere Verknüpfung der beiden Ebenen. Dies verdeutlicht der vorgestellte Versuch zur Polarisation und Verschränkung von Lichtquanten. Die Nutzung einer Augmented-Reality-Brille ermöglicht während des Experimentierens nicht nur die Echtzeit-Darstellung von Messdaten, sondern erlaubt es auch, die Effekte experimenteller Handlungen direkt im Experiment und auf Modellebene zu visualisieren. Überdies ergeben sich neue Interaktionsformen zwischen Lernenden und Experiment.

1. Einleitung

Laborpraktika sind aus der akademischen Ausbildung von Physikerinnen und Physikern nicht wegzudenken. Im Laufe ihres Physikstudiums absolvieren Studierende daher in der Regel mehrere Praxisphasen, beginnend mit einem Grund- oder Anfängerpraktikum. Von diesen einführenden Praktika wird sowohl seitens der Lehrenden als auch der Lernenden neben dem Erlernen von Fachmethoden auch die Vermittlung von konkreten Fachinhalten erwartet [1;2]. So erhoffen Lernende sich von der Durchführung der Versuche beispielsweise eine bessere Verknüpfung von Theorie und Praxis, um ein ganzheitliches Verständnis der Fachinhalte aufzubauen [1;3]. Auch die Konferenz der Fachbereiche Physik definiert die Anwendung theoretischer Grundlagen im Experiment und den Aufbau angemessener Vorstellungen von Phänomenen als wesentliche Ziele, die durch Laborpraktika erreicht werden sollen [4].

Es bleibt jedoch fraglich, ob physikalische Laborpraktika in ihrer üblichen Form dieser Zielsetzung auch in der Praxis gerecht werden. Untersuchungen von Holmes et al [5] und Wiemann & Holmes [6] kommen beispielsweise zu dem Schluss, dass sich aus der Teilnahme an experimentellen Übungen weder langfristig noch kurzfristig ein nachweisbare Effekte auf das konzeptuelle Verständnis, gemessen an Prüfungsergebnissen, nachweisen lassen. Analysen der Handlungen von Studierenden während der

Versuchsdurchführung zeigen zudem, dass diese die meiste Zeit mit reinen Routinetätigkeiten wie dem Aufnehmen von Messwerten beschäftigt sind – eine Beschäftigung mit inhaltlichen Aspekten, also den zugrundeliegenden physikalischen Konzepten, nimmt dagegen nur einen sehr geringen Zeitanteil der Durchführung ein [1;7].

Der durch die empirischen Befunde aufgezeigte Kontrast zwischen den intendierten Zielen und der Realität im Praktikum erscheint umso größer, wenn man bedenkt, dass schon bei der Konzeption der Praktikumsversuche didaktische Überlegungen und Zielsetzungen mit einfließen. Die Versuche bilden zu einem großen Teil kanonische Lehrinhalte der Grundvorlesungen ab, sie sind in hohem Maße auf diese Inhalte optimiert und in Bezug auf die Durchführung vorstrukturiert. Insofern stehen diese Versuche auch in engem Bezug zu etablierten Modellen physikalischer Phänomene, die durch sie verdeutlicht werden sollen. Vor diesem Hintergrund lässt sich eine mögliche Ursache des Problems in der Tatsache verorten, dass der Bezug zum zugrundeliegenden Modell nicht aus dem Versuch allein erschlossen werden kann. Holmes et al. bringen das Problem folgendermaßen auf den Punkt [5]:

„Although the relevant physics concepts were central to the thinking of the instructor that designed and built the experiments, those concepts get little, if any, attention from the student carrying out the assigned activities using that apparatus.“

Aus didaktisch-praktischer Sicht liegt es daher nahe, das einem Versuch zugrundeliegende und anzuwendende Modell expliziter zu machen, indem zusätzliche Repräsentationen angeboten werden. Der Verzahnung solcher Repräsentationen mit den experimentellen Handlungen selbst sind jedoch in den meisten Fällen durch die zur Verfügung stehenden Medien Grenzen gesetzt.

Mit neuen technologischen Entwicklungen sind jedoch neue Möglichkeiten entstanden, die Modellenebene besser mit dem Experiment zu verzahnen. Insbesondere Technologien der sogenannten „erweiterten Realität“ („Augmented Reality“, bzw. „Mixed Reality“) bieten dabei die Gelegenheit, die Durchführung von Praktikumsversuchen anders zu gestalten und so Modell und Experiment interaktiv aufeinander zu beziehen. Damit eröffnen sich neben neuen praktischen Gestaltungsmöglichkeiten auch auf der Forschungsebene neue Fragen in Bezug auf Gestaltungsprinzipien derartiger Lernumgebungen und die Beziehung der Repräsentationsformen untereinander. Die hier vorgestellte Lernumgebung zum Themenbereich Polarisation soll im Rahmen des begleitenden, vom BMBF geförderten Forschungsprojektes „MiReQu“ einen Beitrag zur Klärung dieser Fragen leisten, wie in [8] detailliert beschrieben worden ist. Im Folgenden sollen vor allem aus didaktisch-praktischer Sicht verschiedene Gestaltungsaspekte der neu entwickelten Lernumgebung diskutiert werden.

2. Was ist Mixed-Reality?

Die Begriffe „Augmented Reality“ (AR) und „Mixed Reality“ (MR) bezeichnen keine bestimmte Technologie, sondern sind vielmehr ein Sammelbegriff für verschiedene technische Umsetzungen eines bestimmten Konzeptes, bei dem es darum geht, die physische Realität mit virtuellen Elementen anzureichern [9].

Da die Definition der Begriffe sehr weit gefasst ist, sind auch die mit den Begriffen betitelten Anwendungen sehr unterschiedlich und es bieten sich Charakterisierungen anhand verschiedener Merkmale an. Neben der Charakterisierung anhand technischer Merkmale (z. B. Darstellung über ein 3D-Headset oder ein 2D Handydisplay), ist ein weit verbreitetes Schema das von Milgram et al. [10] vorgeschlagene Realitäts/Virtualitäts-Kontinuum (Abb. 1).



Abb. 1: Realitäts/Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram et al. [10].

An einem Ende des Schemas steht die rein physische Realität ohne jegliche Zusatzelemente. Das andere Extrem stellt eine rein virtuelle Realität dar, in der

alle verfügbaren Sinneseindrücke digital generiert werden. Mixed Reality umfasst den weiten Bereich zwischen diesen Extrema, innerhalb dessen je nach Grad der digitalen Anreicherung weiter unterschieden werden kann. Da allerdings die Begriffe „Augmented Reality“ und „Augmented Virtuality“ fließend ineinander übergehen, wird im Folgenden bewusst der weite Begriff „Mixed Reality“ verwendet.

Abgesehen vom Anteil digitaler Zusatzelemente ist eine weitere wichtige Dimension zur Beschreibung von MR-Anwendungen der Grad an Immersion, der durch die Anwendung erzeugt wird. Immersiv ist eine digitale oder digital angereicherte Anwendung dann, wenn sie in der Interaktion mit digitalen Elementen beim Anwender das Gefühl erzeugt, mit echten Dingen und Gegenständen zu interagieren [11]. Um Immersion zu erzeugen ist daher ein hohes Maß an Interaktivität zwischen realen Handlungen des Nutzers und den digitalen Elementen der Anwendung erforderlich. In Bezug auf die Umsetzung einer MR-Lernumgebung im Praktikum erscheint ein möglichst hohes Maß an Immersion und Interaktivität sinnvoll. Daher wird für die technische Umsetzung die Microsoft HoloLens 2 verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Headset ähnlich einer Brille. Auf die Brillengläser werden dreidimensionale Hologramme projiziert, mit denen ohne zusätzliche Controller per Handgesten interagiert werden kann. Diese Art der Implementierung bietet maximale Immersion in Bezug auf die visuellen Zusatzelemente und ermöglicht gleichzeitig das ungehinderte Experimentieren mit beiden Händen am realen Versuch. Zur Herstellung von Interaktivität mit dem Versuchsaufbau werden zudem digitale Messwerterfassungssysteme genutzt.

3. Mixed Reality im Praktikum

Die beiden zunächst auf technischer Ebene motivierten Konzepte Immersion und Interaktivität lassen sich auch aus didaktischer Perspektive in Hinblick auf das Praktikum reflektieren. Interaktivität und Immersion beruhen auf der Beziehung verschiedener Repräsentationsformen zueinander. Die kognitive Verarbeitung von verschiedenen Repräsentationsformen ist im Rahmen verschiedener lernpsychologischer Theorien modelliert worden, u. a. von Schnotz & Bannert [12] und von Mayer [13].

Durch Einbezug interaktiver und immersiver MR-Techniken verändert sich das Lernen und Arbeiten im Praktikumsversuch an verschiedenen Punkten. Diskutiert werden diese Punkte am Beispiel von typischen, im Anfängerpraktikum üblichen Versuchen zur Polarisation von Licht. Das didaktische Konzept und die zugehörige MR-Lernumgebung wurden im Rahmen des Projekts MiReQu in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Didaktik der Physik und dem Center for Nanotechnology der WWU Münster und dem Department Design der HAW Hamburg, entwickelt. Der erste Einsatz im

Anfängerpraktikum Physik wird an der WWU Münster im Sommersemester 2021 erfolgen.

3.1. Mixed Reality erhöht die Anzahl der zur Verfügung stehenden Repräsentationen

Betrachtet man den Ablauf eines typischen Praktikumsversuches mit allen Phasen der Vor- und Nachbereitung wird deutlich, dass in den zur Verfügung stehenden Materialien durchaus ein hoher Modellbezug vorhanden ist und dieser sich in verschiedenen Repräsentationsformen ausdrückt: in der Vorbereitungsphase erhalten die Studierenden zumeist eine schriftliche Anleitung, in der die wesentlichen theoretischen Grundlagen erläutert und ggf. auch grafisch dargestellt werden. Zur Nachbereitung erstellen die Studierenden in der Regel einen Versuchsbericht, in dem sie ihre Messdaten aufbereiten und diskutieren. Dabei erstellen sie selbst verschiedene Repräsentationsformen in Form von Abbildungen, Texten, Plots usw. Hier reflektieren die Studierenden im Idealfall den zuvor durchgeführten Versuch vor dem Hintergrund der zugrundeliegenden Fachkonzepte.

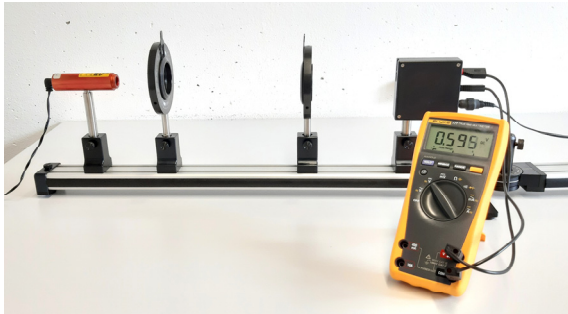


Abb. 2: Typischer Versuchsaufbau zum Gesetz von Malus.

Die Auseinandersetzung mit den Fachkonzepten in Form des Versuchsberichts findet jedoch erst deutlich nach der Versuchsdurchführung statt. Während der Durchführung selbst stehen den Studierenden dagegen bis auf den realen Versuchsaufbau nur wenige oder sehr unspezifische Repräsentationen zur Verfügung, wobei der Versuchsaufbau selbst, wie eingangs geschildert, keinen unmittelbaren Modellbezug erkennen lässt. Diese Situation ist für den beispielhaften Versuch zum Gesetz von Malus in Abb. 2. dargestellt.

Studierende messen in diesem im Versuch die Spannung an einer Fotodiode in Abhängigkeit vom Winkel zwischen zwei Polarisationsfiltern. Das zugrundeliegende Fachkonzept, das zur Interpretation des Versuchs benötigt wird, ist ein vektorielles Verständnis von Polarisation als Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes, sowie ein räumliches Verständnis von der Lage der beiden Polfilterachsen zueinander. In der konventionellen Variante des Versuchs steht den Studierenden lediglich der aktuelle Messwert der Fotodiode zur Verfügung. Die gesuchte Gesetzmäßigkeit erschließt sich jedoch erst aus mehreren Messwerten, die dann noch mental in Bezug zum Vektormodell gebracht werden müssen.

Durch Einsatz von MR können dagegen spezifisch für den aktuellen Versuch und die vorgenommenen Einstellungen visuelle Modellrepräsentationen einblendet werden. In Abb. 3 wird beispielsweise der Verlauf des Laserstrahls sowie dessen Polarisationsrichtung im jeweiligen Abschnitt visualisiert. Für jeden der beiden Polarisationsfilter wird die aktuelle Einstellung der Transmissionsachse sowie die Amplitude der ankommenden und der ausgehenden Lichtwelle vektorieLL dargestellt. Zusätzlich können auch aufgenommene Messwerte direkt grafisch dargestellt werden, sodass die Tätigkeit des Messens keine bloße Notwendigkeit zur späteren Auswertung mehr darstellt, sondern unmittelbar zur Modellreflexion genutzt werden kann.

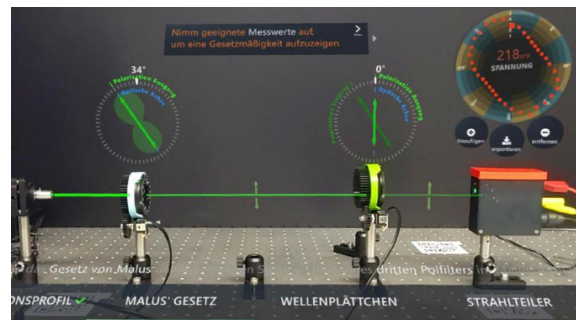


Abb. 3: Zusätzlich verfügbare Repräsentationen beim Blick durch die HoloLens 2.

3.2. Mixed Reality erhöht die Verzahnung der Repräsentationen untereinander

Durch die digitale Anreicherung mithilfe der HoloLens stehen den Lernenden nicht nur mehr Repräsentationen zur Verfügung: Anders als z. B. bei Visualisierungen auf einem Computerbildschirm lassen sich die visuellen Darstellungen räumlich an passender Stelle direkt im realen Aufbau einblenden. Dadurch können zusammengehörige Elemente visuell auf einen Blick erfasst und redundante Darstellungen vermieden werden. Für die klassischen Medien Text und Bild sind bereits viele Untersuchungen durchgeführt worden, die nahelegen, dass die räumliche Nähe von zusammengehörigen Darstellungen einen positiven Effekt auf das Lernen erzeugt [14]. Im Rahmen der kognitiven Theorie multimedialen Lernens ist dieser Effekt als das Kontiguitätsprinzip bekannt und wird damit erklärt, dass Lernende weniger kognitive Ressourcen dafür aufwenden müssen, zusammengehörige Elemente in Beziehung zueinander zu setzen [15]. Erste Hinweise für die Übertragbarkeit des Kontiguitätsprinzips auf MR-Settings liefert beispielsweise eine Untersuchung von Strzys et al [16].

In Bezug auf die Verzahnung der Repräsentationsformen gehen die Möglichkeiten von MR jedoch über die der klassischen Medien hinaus, da die Interaktivität als wesentliches Merkmal hinzukommt. Damit die Handlungen der Nutzer sich dynamisch auf die digitalen Elemente der Lernumgebung aus-

wirken können, ist es notwendig, entsprechende Parameter wie z. B. die Drehung eines Polfilters kontinuierlich digital zu erfassen. Das Messwertfassungssystem im konkreten Beispiel wurde mithilfe eines Arduino-Microcontrollers realisiert (Abb. 4 & 5).



Abb. 4: Modifizierte Halterung zur Erfassung des Drehwinkels optischer Komponenten.

Im Polarisationsversuch werden die Drehwinkel von bis zu drei optischen Bauteilen und zusätzlich die Spannung an bis zu zwei Fotodioden ausgelesen. Drehungen an einer optischen Komponente wirken sich direkt auf die Darstellung des Vektormodells und die Messwertanzeige im Datenplot aus.

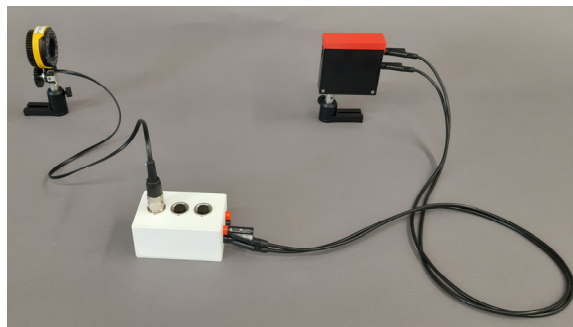


Abb. 5: Umsetzung der digitalen Messwertfassung. In der Adapterbox befindet sich ein Arduino-Microcontroller.

Dadurch rücken die Handlungsebene im Experiment sowie die Beziehung zwischen Handlungsebene und anderen Repräsentationen stärker in den Fokus, als bisher in den theoretischen Rahmungen multimedialen Lernens berücksichtigt worden ist. Der stärkere Einbezug der Handlungsebene und des Experiments als eigenständige Repräsentationsformen in die theoretische Rahmung von Lernprozessen erscheint gerade in Bezug auf die Naturwissenschaften auch unabhängig von MR-Lernumgebungen sinnvoll, wie z. B. von Laumann et al [17] dargelegt. Setzt man die Notwendigkeit einer Erweiterung des theoretischen Rahmens voraus, bietet der beschriebene MR-Versuch die Möglichkeit, gezielt den Grad an Kontiguität zwischen den digitalen Elementen und dem realen Aufbau, an dem die Interaktion stattfindet, zu variieren und so ein erweitertes Kontiguitätsprinzip multimedialen Lernens empirisch zu untersuchen. Dies ist aus Forschungsperspektive das Hauptziel des MiReQu-Projektes [8].

3.3. Mixed Reality ermöglicht neue Formen experimenteller Handlungen

Das beispielhaft in Abb. 2 dargestellte Experiment zum Gesetz von Malus in der traditionellen Form ohne MR beinhaltet an experimentellen Handlungen in erster Linie das Drehen von Polfiltern sowie das Ablesen der Messwerte auf dem Multimeter. Das Drehen der Polfilter als zentrale Handlung am Experiment mit Bezug zum Fachkonzept bleibt in der MR-Lernumgebung unverändert erhalten. Darüber hinaus lassen sich aber viele weitere notwendige Handlungen innerhalb der MR-Lernumgebung grundlegend anders gestalten, um diese stärker in Bezug zu den relevanten Inhalten zu setzen.

Ein Beispiel, das bereits angesprochen wurde, ist die Aufnahme von Messwerten. Einerseits steht den Lernenden schon beim Experimentieren eine grafische Repräsentation in Form eines Polardiagramms zur Verfügung, was es ihnen erleichtern soll, die verschiedenen Darstellungsebenen kohärent aufeinander zu beziehen [18].

Andererseits kann die zur Messwertaufnahme notwendige Interaktion deutlich einfacher und zeitsparender gestaltet werden: Durch Fingerdruck auf einen unter dem Diagramm schwebenden Button können Messwerte digital hinzugefügt, gelöscht oder exportiert werden (Abb. 5). Gegenüber herkömmlicher digitaler Messwertfassung bietet sich hier erneut der Vorteil, dass die Interaktion in direkter räumlicher Nähe zum relevanten Element im Experiment (nämlich der Fotodiode) erfolgt.

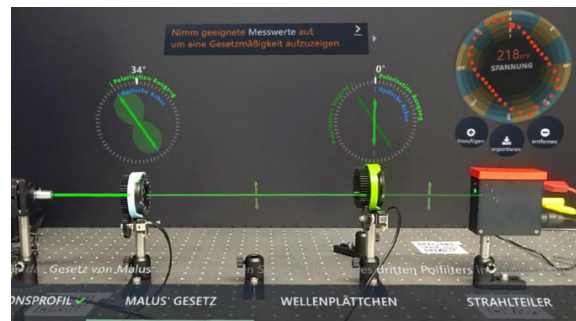


Abb. 5: Messwertdiagramm mit Buttons zur Messwertaufnahme.

Zusätzlich lassen sich auch Hilfestrukturen unmittelbar in die MR-Lernumgebung integrieren. So können Lernende mit dem Finger auf jede Komponente im Aufbau zeigen und erhalten über ein Kontextmenü Informationen zu deren Funktionsweise im Aufbau.

Komplexere Aufgaben lassen sich durch Einblendung von konkreten Teilaufgaben besser und intuitiver in sinnvolle Abschnitte zergliedern, sodass Studierenden die Bearbeitung leichter fällt. Intendiert ist zudem, die Studierenden durch die Einblendung von gezielten Beobachtungsaufgaben ohne konkreten Messauftrag stärker zur Modellreflektion und zur Arbeit mit verschiedenen Repräsentationen anzuregen und so den Fokus der Studierenden vom bloßen

Messwerte Aufnahmen weg zu lenken. Diese Strategien sind aus der Theorie multimedialen Lernens für Text und Bild als das Segmentierungs- und das Signalprinzip bekannt [19]. Zusätzlich erhöht sich auch durch diese Maßnahmen die Kontiguität der Repräsentationsformen: ein separater Aufgabenzettel wird nicht benötigt.

Ein Beispiel für die Anwendung des Segmentierungsprinzips aus dem Polarisationsversuch ist in Abb. 6 gezeigt. Der hier gezeigte Versuchsteil geht über die klassischen Polarisationsversuche hinaus und beschäftigt sich mit dem Quantenphänomen der Polarisationsverschränkung einzelner Photonen. Ein typischer Experimenteller Test auf Verschränkung ist das Messen von Korrelationen mithilfe einer Variante der Bell'schen Ungleichung [20;21]. Hierzu müssen 16 verschiedene, vorgegebene Winkelkombinationen an zwei Polfiltern eingestellt werden. Das Einstellen der vorgegebenen Winkel ist in diesem Fall eine reine experimentelle Notwendigkeit, weshalb die Lernumgebung die Studierenden schrittweise durch die richtigen Einstellungen hindurchführt. Inhaltlich relevanter ist dagegen das Korrelationskonzept, das den Einzelmessungen zugrunde liegt. Die aktuell gemessene Korrelationsfunktion wird deshalb grafisch aufgearbeitet in einem 2x2-Schema dargestellt, sodass die Studierenden sehen können, zu welcher Korrelation ihre Mess-einstellungen jeweils führen. Das anspruchsvolle Thema Verschränkung wurde bewusst als Abschluss des neu entwickelten Versuchs ausgewählt, um die neuen Gestaltungsmöglichkeiten auch an einem Thema zu testen, das sich ansonsten jeder Anschauung entzieht [8].



Abb. 6: Assistentensystem zur Einstellung der richtigen Winkel bei Messung der Bell'schen Ungleichung (unten links) und grafische Darstellung der Korrelationsfunktion (oben rechts).

4. Ausblick und Grenzen des MR-Einsatzes

Die dargestellten Überlegungen zur Gestaltung der MR-Lernumgebung machen sowohl deutlich, wie etablierte und empirisch abgesicherte Gestaltungsprinzipien multimedialen Lernens durch Mixed Reality in einem handlungsorientierten Kontext umsetzen lassen, als auch welche neuen Fragen sich in

Bezug auf die Verknüpfung von Handlungsebene und anderen Repräsentationsformen in diesen Kontexten ergeben.

Viele der vorgestellten Aspekte lassen sich dabei nicht nur mit aktuell noch teurer Technik wie der HoloLens 2 umsetzen, sondern auch mit anderen Formen von digitalen Lernumgebungen nutzbar machen. Leitgedanke der Umsetzung ist vor allem der der Interaktivität von Repräsentationen. Die Grundidee, den Studierenden dynamische Repräsentationen von Modellen zur Verfügung zu stellen, lässt sich dabei auch mit einfacheren digitalen Mitteln realisieren, z. B. auf dem PC oder dem Handy. Die entscheidende Technik hierfür steckt nicht in der HoloLens, sondern in der in Abb. 4 gezeigten Box, die ausschließlich aus günstigen Bauteilen besteht. Diesem Gedanken folgend werden im Rahmen des Projektes MiReQu auch noch andere Formate der Lernumgebung entwickelt, beispielsweise eine Web3D-Umgebung, die in Form eines Remote Labs auch anderen Standorten zugänglich gemacht werden soll.

Bei aller Begeisterung für die neuen Möglichkeiten der hier vorgestellten Technik ist jedoch abschließend zu beachten, dass sich die Gestaltung und Zusammenstellung von Praktikumsversuchen an den jeweils intendierten Zielen orientieren muss. Die vorgestellte Versuchsumgebung zielt explizit auf die Erarbeitung von Fachkonzepten zum Thema Polarisation. Die Vermittlung anderer Fähigkeiten, z. B. methodischer Kompetenzen wie das korrekte Ablezen von Messgeräten, kommt dagegen im MR-Versuch weniger zum Tragen. Insbesondere, wenn wie im vorgestellten Versuch auch komplexe Inhalte wie Verschränkung thematisiert werden, die aus sich heraus bereits das Potential bergen, Lernende zu überfordern, lässt sich dies durchaus rechtfertigen. Die Aufbereitung in der hier vorgestellten Form ist aber sicher nicht für jeden Praktikumsversuch sinnvoll und wünschenswert. Experimentelle Kompetenzen umfassen mehr als nur die inhaltliche Seite [22]. Sofern es das Ziel der Anfängerpraktika sein soll, Studierenden einen möglichst breiten Eindruck von der experimentellen Seite der Physik und den damit verbundenen Tätigkeiten und Fähigkeiten zu vermitteln, ist am Ende die Mischung aus eher modellorientierten, methodisch ausgerichteten oder auch ideengeschichtlich relevanten Experimenten entscheidend.

5. Literatur

- [1] Haller, K. (1999): Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum. Berlin: Logos.
- [2] Welzel-Breuer, M.; Haller, K.; Bandiera, M.; Hammelev, D.; Koumras, P.; Niedderer, H.; Paulsen, A.; Bécu-Robinault, K.; von Aufschneider, S. (1998): Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaft-

- lichen Ausbildung verbinden. Ergebnisse einer europäischen Umfrage. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 4(1), S. 29-44.
- [3] Nagel, C.; Scholz, R.; Weber, K. (2018): Umfrage zu den Lehr/Lernzielen in physikalischen Praktika. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Würzburg 2018, S. 97-109. <http://phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/829/974> (Stand 5/2021).
- [4] Konferenz der Fachbereiche Physik (Hg.) (2010): Zur Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen in der Physik. https://www.kfp-physik.de/dokument/KFP_Handreichung_Konzeption-Studiengaenge-Physik-101108.pdf (Stand 5/2021).
- [5] Holmes, N. G.; Olsen, J.; Thomas, J. L.; Wieman, C. E. (2017): Value added or misattributed? A multi-institution study on the educational benefit of labs for reinforcing physics content. In: Physical Review Physics Education Research 13(1), 10129.
- [6] Wieman, C. E.; Holmes, N. G. (2015): Measuring the impact of an instructional laboratory on the learning of introductory physics. In: American Journal of Physics 83(11), S. 972-978.
- [7] Hucke, L. (1999): Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computer-gestützten Experimenten des physikalischen Praktikums. Berlin: Logos.
- [8] Schlummer, P.; Lauströer, J.; Schulz-Schaeffer, R.; Abazi, A.; Schuck, C.; Pernice, W.; Heuser, S.; Laumann, D. (2020): MiReQu – Mixed Reality Lernumgebungen zur Förderung fachlicher Kompetenzentwicklung in den Quantentechnologien. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2020, S. 451-459. <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1044/1138> (Stand 5/2021).
- [9] Carmigniani, J.; Furth, B. (2011): Augmented Reality: An Overview. In: B. Furth (Hg.): Handbook auf augmented reality. New York: Springer, S. 3.46.
- [10] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F. (1994): Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Telemanipulator and Telepresence Technologies, 2351, S. 282-292.
- [11] Jensen, L.; Konradsen, F. (2018): A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. In: Education and Information Technologies 23(4), S. 1515-1529.
- [12] Schnotz, W.; Bannert, M. (2003) Construction and interference in learning from multiple representation. In: Learning and Instruction 13(2), S. 141-156.
- [13] Mayer, R. E. (2014): Cognitive Theory of Multimedia Learning. In: R. E. Mayer (Hg.): The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, S. 43-71.
- [14] Schroeder, N. L.; Cencki, A. T. (2018): Spatial Contiguity and Spatial Split-Attention Effects in Multimedia Learning Environments: A Meta-Analysis. In: Educational Psychology Review 30, S. 679-701.
- [15] Mayer, R. E.; Fiorella, L. (2014): Principles for Reducing Extraneous Processing in Multimedia Learning: Coherence, Signaling, Redundancy, Spatial Contiguity and Temporal Contiguity Principles. In: R. E. Mayer (Hg.): The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, S. 279-315.
- [16] Strzys, M. P.; Kapp, S.; Thees, M.; Klein, P.; Lukowicz, P.; Knierim, P.; Schmidt, A.; Kuhn, J. (2018): Physics holo.lab learning experience: Using smartglasses for augmented reality lab-work to foster the concepts of heat conduction. In: European Journal of Physics 39(3), 035703.
- [17] Laumann, D. (2017): Integrativer Einsatz realer und interaktiver digitaler Repräsentationen in der Physik. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2017, S. 251-256. <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/752/904> (Stand 5/2021).
- [18] Seufert, T. (2003): Supporting coherence formation in learning from multiple representations. In: Learning and Instruction 13(2), S. 227-237.
- [19] Mayer, R. E. (2009): Segmenting Principle. In: R. E. Mayer (Hg.): Multimedia Learning. Cambridge: Cambridge University Press, S. 175-188.
- [20] Clauser, J. F.; Horne, M. A.; Shimony, A.; Holt, R. A.; (1970): Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letters 23(15), S. 880-884.
- [21] Kwiat, P. G.; Mattle, K.; Zeilinger, A.; Sergienko, A. V.; Smith, Y. (1995): New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs. In: Physical Review Letters 75(24), S. 4337-4341.
- [22] Schreiber, N.; Theyßen, H.; Schecker, H. (2009): Experimentelle Kompetenz messen?! In: PhyDid 3(8), S. 92-101.

Danksagung

Wir danken Dr. Alexander Pusch vom Institut für Didaktik der Physik der WWU Münster für seine Ideen zur Umsetzung der Drehwinkelmessung mit dem Arduino und für seine technische Expertise bei der Implementierung.