

MiReQu – Mixed Reality Lernumgebungen zur Förderung fachlicher Kompetenzentwicklung in den Quantentechnologien

Paul Schlummer*, Jonas Lauströer+, Reinhard Schulz-Schaeffer+, Adrian Abazi°, Carsten Schuck°, Wolfram H. P. Pernice°, Stefan Heusler* und Daniel Laumann*

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

+Department Design, HAW Hamburg, Finkenau 35, 22087 Hamburg

°Center for Nanotechnology, WWU Münster, Heisenbergstr. 10, 48149 Münster

paul.schlummer@wwu.de, Jonas.Laustroeer@haw-hamburg.de, reinhard.schulz-schaeffer@haw-hamburg.de,
Adrian.abazi@wwu.de, carsten.schuck@wwu.de, wolfram.pernice@wwu.de, stefan.heusler@wwu.de,
daniel.laumann@wwu.de

Kurzfassung

In der Quantenoptik existieren Lehrangebote mit Einzelphotonenquellen, die zentrale Konzepte der Quantenphysik wie Verschränkung für Lernende im Experiment erfahrbar machen sollen. Die theoretische Modellierung abstrakter Konzepte und deren Interpretation bei der Anwendung auf das reale Experiment stellen hierbei jedoch eine Herausforderung für Lernende dar. Daher stellt sich bei quantenoptischen Experimenten aus didaktischer Sicht in besonderem Maße die Frage nach Gestaltungsprinzipien, die einen integrativen Umgang mit Repräsentationen auf verschiedenen Darstellungsebenen ermöglichen und die Handlungsebene einbeziehen. Im Projekt MiReQu soll erstmals geklärt werden, ob und wie die Lücke zwischen experimenteller und abstrakter Modellebene durch integrativen Einsatz von Mixed Reality Lernumgebungen im Kontext von Praktikumsversuchen zu verschränkten Photonen verkleinert werden kann. Schwerpunkte bilden die Entwicklung passgenauer virtueller Erkenntnisinstrumente und die empirische Untersuchung von erweiterten Gestaltungsprinzipien des multimedialen Lernens.

1. Einleitung

Unter den verschiedenen Fachgebieten der modernen Physik gilt die Quantenphysik bei Lernenden einerseits als besonders faszinierend und andererseits zugleich als besonders abstrakt, unintuitiv und schwierig [1]. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Konsequenzen der Quantenphysik nicht mit dem deterministischen Weltbild der klassischen Physik oder der intuitiven Alltagserfahrung in Einklang bringen lassen. Wie kann bspw. ein Elektron, dessen Position beim Auftreffen auf einen Leuchtschirm genau bestimmt werden kann, vor seinem Auftreffen auf den Schirm keine festgelegte Bahnkurve besitzen? Dementsprechend schwer fällt den Lernenden der Aufbau eines Verständnisses von Konzepten wie Verschränkung, Superposition oder dem statistischen Verhalten von Quantenobjekten. Zudem sind sich fast 100 Jahre nach der Kopenhagener Konferenz auch Expertinnen und Experten des Faches in philosophischen Fragen der Interpretation der Quantentheorie keineswegs einig, sodass das Motto ‚shut up and calculate‘ immer noch eine weit verbreitete Maxime bei Lehrenden zu sein scheint [2].

Die Behandlung des Themas in der universitären Lehre findet konsequenterweise größtenteils formal-mathematisch im Rahmen der Grundvorlesungen mit angeschlossenen Übungen statt, und dementsprechend sind zumeist auch die abschließenden Prüfun-

gen ausgelegt. Dagegen zeigen qualitative Analysen, dass auch Studierende mit guten bis sehr guten Klausurergebnissen häufig an lokal-realistischen Argumentationen festhalten, um Quantenphänomene zu beschreiben [1;3;4], oder immer noch klassische Vorstellungen von Quantenobjekten artikulieren. Hierzu gehört bspw. das Festhalten an der Eigenschaft definierter Trajektorien, oder eine Vorstellung von Quantenobjekten als kleinen Partikeln [5;6]. Um das konzeptuelle Lernen im Bereich der Quantenphysik zu unterstützen erscheint es daher sinnvoll die bisherige Praxis um weitere Ansätze zu ergänzen. Hierzu existieren bereits viele Best-Practice-Beispiele, die zeigen, dass konzeptuell orientierte Lehransätze unter Verwendung geeigneter Visualisierungen und Simulationen dazu beitragen können, die geschilderten Denkmuster aufzubrechen oder zu vermeiden [7-11]. Zugleich besteht aber weiterer Forschungsbedarf an verallgemeinerbaren Lehrkonzepten und Erhebungsinstrumenten [12].

Insbesondere der Einbezug experimenteller Aktivitäten über Analogieexperimente oder rein virtuelle Formate hinaus ist bisher noch nicht umfassend untersucht worden. Das Projekt MiReQu soll hierzu einen Beitrag leisten, indem es einen experimentellen Zugang zu grundlegenden Konzepten der Quantenphysik mit mathematisch adäquaten Visualisierungen in verschiedenen Mixed Reality (MR) Ler-

numgebungen zusammenführt. Im Gegensatz zu vollständig computergenerierten Lernumgebungen, die durch verschiedene Feedback-Mechanismen ein künstliches Gefühl von Immersion und damit eine rein virtuelle Realität erzeugen, werden in MR-Lernumgebungen virtuelle und reale Elemente interaktiv zueinander in Beziehung gesetzt [13].

Das Projekt ist eine Kooperation von Fachphysik, Fachdidaktik und Wissenschaftsillustration und deckt daher eine große Bandbreite von Entwicklungszielen und Forschungsinteressen ab (Abb. 1).

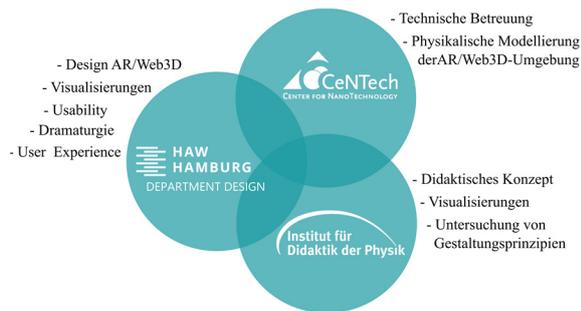


Abb.1: Kooperationspartner und Aufgabenbereiche im MiReQu-Projekt.

Aus didaktischer Sicht vereint eine solche multimediale Lernumgebung primär verschiedene Abstraktionsebenen und Darstellungsformen. Daher stellt sich die Frage, wie diese verschiedenen Darstellungsformen sinnvoll aufeinander bezogen werden können und wie die Lernumgebung adäquat strukturiert werden kann, insbesondere in Hinblick auf die Vermittlung von Konzeptwissen. Das Forschungsinteresse des Projekts besteht darin, Gestaltungsprinzipien für multimediale Lernumgebungen in einem komplexen experimentellen Kontext zu untersuchen.

2. Experimentelle Zugänge zur Quantenoptik

Anders als bei anderen Themengebieten der Grundvorlesungen wie die klassische Mechanik oder die Elektrodynamik bieten die parallel verlaufenden Praktika bisher wenig Gelegenheit, die in der theoretischen Vorlesung vermittelten Inhalte auf einen experimentellen Kontext anzuwenden. Insbesondere im Bereich der Quantenoptik gibt es jedoch Ansätze, Einzelphotonenquellen für Experimente mit Studierenden und teilweise auch Schülerinnen und Schülern zu nutzen [14-16]. Mithilfe von Parametrischer Fluoreszenz in doppelbrechenden Kristallen können Einzelphotonenpaare erzeugt werden, anhand derer Quanteneffekte untersucht werden können. In bestimmten Konfigurationen lässt sich bspw. Polarisationsverschränkung des Photonenpaares realisieren, welche durch Korrelationsmessungen im Experiment charakterisiert werden kann [17].

Es besteht also die Möglichkeit, neben der theoretisch-abstrakten Darbietung der Quantenphysik auch auf der konkreten experimentellen Ebene Angebote für Lernende zu schaffen. Aus didaktischer Sicht steht jedoch zu vermuten, dass unter den üblichen Praktikumsbedingungen die experimentellen Hand-

lungen selbst wenig zum konzeptuellen Lernen beitragen können. Zunächst wirkt der experimentelle Aufbau an sich auf den ersten Blick überkomplex und beinhaltet eine Vielzahl ähnlich aussehender, potentiell unbekannter Komponenten. Zudem kann das Experiment aufgrund der Abstraktheit der behandelten Gegenstände für sich allein betrachtet nichts veranschaulichen, da die Eigenschaften der Lichtquanten in keiner Weise optisch, haptisch oder anderweitig erfahrbar gemacht werden können. Die Kenntnis der relevanten theoretischen Konzepte wird vielmehr bereits vorausgesetzt und diese können durch die mathematische Auswertung der Messdaten in einem experimentellen Kontext angewandt werden. Aber auch die bloße Übertragung von bekannten abstrakten Konzepten auf die konkrete experimentelle Situation stellt eine Herausforderung für Lernende dar, da sie rein gedanklich erfolgen muss, indem bereits vorher Gelerntes in Erinnerung gerufen und auf die neue Situation angewendet wird.

Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass der Beitrag des Experiments zum konzeptuellen Lernen gering und zugleich die kognitive Belastung aufgrund der beschriebenen Brüche hoch sein wird.

Der Bruch zwischen Experiment- und Modellebene ist nicht nur im Bereich der Quantenphysik, sondern in der Vermittlung physikalischer Konzepte generell ein potentielles Lernhindernis, mit dem es umzugehen gilt. Eine enge Verzahnung von theoretischen Modellen und experimentellen Lerninhalten ist daher bei der Konzeption von Laborkursen und Praktika unabhängig vom Fachgebiet von großer Bedeutung, wenn konzeptuelles Lernen angestrebt wird [18]. Es werden daher bereits neue Lehrkonzepte erprobt – und dies teilweise auch unter Einbezug von Elementen der virtuellen oder erweiterten Realität [19-21].

In der Quantenphysik besteht jedoch im Vergleich zu anderen Gebieten eine zusätzliche Schwierigkeit, die den Bruch zwischen Experiment und Modellebene besonders groß erscheinen lässt: Da Quantenobjekte nicht im realen Anschauungsraum beschrieben werden können, lassen sie sich auch nicht unmittelbar in Bezug zu einem realen experimentellen Aufbau setzen. Insofern besteht hier in besonderem Maße die Notwendigkeit, die Grenzen des im Experiment Erfahrbaren mithilfe von geeigneten zusätzlichen Repräsentationsformen wie z. B. Visualisierungen zu erweitern. Eine Möglichkeit, dieser Anforderung zu begegnen, besteht daher in der Entwicklung von geeigneten interaktiven Lernumgebungen unter Einbezug multipler Repräsentationsformen.

3. Theoretischer Rahmen: Lernen mit multiplen Repräsentationen

Das Ziel einer multimedialen Lernumgebung zum Einsatz bei quantenoptischen Experimenten muss aufgrund der skizzierten Brüche sein, einerseits die experimentellen Handlungen verstärkt in Bezug zu

den relevanten abstrakten Konzepten der Quantenphysik zu setzen, andererseits die kognitive Belastung für Lernende zu senken. Beides soll in MiReQu durch die Einblendung dynamischer Visualisierungen in verschiedenen MR-Varianten erreicht werden. Diese Herangehensweise lässt sich mit Bezug auf kognitive Theorien multimedialen Lernens begründen.

3.1. Cognitive Load und multimediales Lernen

Untersuchungen des Lernens mit multimedialen Lernumgebungen und den darin enthaltenen Repräsentationen müssen auf der Theorieebene ein Modell der kognitiven Verarbeitung von Reizen unterschiedlicher Sinnesmodalitäten zugrunde legen. In MiReQu bildet diese Grundlage eine Erweiterung der bekannten *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML) [22] und der *Integrated Theory of Text and Picture Comprehension* [23]. Auf Grundlage der *Cognitive Load-Theory* [24] werden in der CTML verschiedene Gestaltungsprinzipien für multimediale Lernumgebungen abgeleitet, durch deren Umsetzung eine möglichst optimale Nutzung der kognitiven Ressourcen der Lernenden erreicht werden soll. Auf die Wirksamkeit solcher Prinzipien deuten die empirischen Befunde zahlreicher Studien hin [24].

Die genannten Ansätze von Mayer und Schnotz & Bannert beziehen sich fast ausschließlich auf visuelle und auditive Reize und die von diesen gespeisten internen Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis. Ein wesentlicher Bestandteil der Lernumgebungen in MiReQu (und in allen naturwissenschaftlichen Fächern) ist jedoch das Experiment und die physische Interaktion mit diesem, weshalb die bisherigen Modelle im Kontext des Projektes einer Erweiterung bedürfen [26]. Auch die in experimentellen Handlungen erfahrenen haptischen Eindrücke werden im Rahmen der erweiterten Theorie als sinntragende Elemente angesehen, die für das Lernen relevante Informationen codieren und so zum Aufbau mentaler Modelle beitragen können. Etablierte Gestaltungsprinzipien müssen vor diesem Hintergrund neu gedacht werden.

3.2. Erweitertes Kontiguitätsprinzip

Für MiReQu von besonderer Relevanz ist das Kontiguitätsprinzip [27]. Nach diesem Prinzip sollten inhaltlich zusammengehörende Elemente einer Lernumgebung auch in räumlicher und zeitlicher Nähe zueinander präsentiert werden [27]. Bei zu großem räumlichem oder zeitlichem Abstand der Elemente (bspw. wenn Messdaten eines Detektors auf einem Bildschirm am anderen Ende des Raumes gezeigt werden) können nicht beide Elemente simultan wahrgenommen werden, weshalb sie sich nur schwer in Beziehung zueinander setzen lassen. Stattdessen muss die Verarbeitung sequenziell erfolgen. Momentan nicht wahrnehmbare Elemente müssen dann als mentale Repräsentation aufgerufen werden, um sie in Beziehung zu einem weiteren,

möglicherweise wahrnehmbaren Element zu setzen. Dieser Vorgang bindet Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses. Eine optimale Verarbeitung ergibt sich nur, wenn zusammengehörige Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis präsent sind, was primär durch hohe räumliche und zeitliche Kontiguität der zugrundeliegenden externen Repräsentationen zu erreichen ist.

Für die oben beschriebene und im folgenden Abschnitt genauer dargestellte Experimentiersituation mit Einzelphotonen kann in Bezug auf die Ebene des Experimentes und der damit verbundenen Handlungen von einer sehr geringen Kontiguität ausgegangen werden. Die in der Durchführung des Experiments vorgenommenen Handlungen beinhalten in erster Linie das Einstellen von Messbasen durch das Drehen von Polarisationsfiltern und Wellenplättchen. Die dadurch erzeugte Projektion des Polarisationszustandes auf die Messachse kann ohne zusätzliche Visualisierung nur indirekt anhand der Zählraten der Einzelphotonendetektoren erschlossen werden. Diese werden auf einem PC-Bildschirm abseits des optischen Tisches angezeigt, sodass während des Experimentierens eine geringe räumliche Kontiguität zwischen Experiment und Messdaten besteht. Der Effekt der Handlungen auf den Polarisationszustand selbst, also der Rückbezug auf die Modellebene, lässt sich nur rein gedanklich erschließen.

Da abstraktere Elemente wie Polarisationszustände nur durch die Einblendungen von Visualisierungen überhaupt zum Gegenstand sinnlicher Wahrnehmung gemacht werden können, lässt sich über die Art und Weise ihrer Einbindung zudem auf einfache Weise der Grad der räumlichen und zeitlichen Kontiguität variieren und so systematisch untersuchen.

4. Projektziele und Konzept der Studie

Primäres Ziel der Studie aus fachdidaktischer Sicht ist die Untersuchung des Einflusses von zeitlicher und räumlicher Kontiguität zwischen experimentellen Handlungen und Visualisierungen auf das konzeptuelle Lernen der Studierenden. Hierzu werden zum experimentellen Aufbau passende, dynamische Visualisierungen auf zwei verschiedene Weisen technisch implementiert. Beide Varianten können in einem weiten Sinne als MR-Lernumgebungen aufgefasst werden, da in ihnen virtuell erzeugte Elemente und reale Repräsentationen dynamisch miteinander verbunden werden [13]. Sie unterscheiden sich jedoch im Grad der räumlichen Kontiguität zwischen den realen und digitalen Repräsentationsformen.

4.1. Augmented-Reality-Lernumgebung

In der durch hohe räumliche Kontiguität gekennzeichneten MR-Variante sollen die relevanten Visualisierungen und Messdaten direkt über eine entsprechende Brille (Microsoft HoloLens 2) in das reale Experiment eingeblendet werden (Abb. 2). Durch Gesten- und Bilderkennung sollen die Darstellungen sich im Rahmen des technisch Machbaren

möglichst dynamisch an die am realen Aufbau vorgenommenen Einstellungen anpassen können.

Da das reale Experiment direkt die Projektionsfläche für digitale Zusatzelemente darstellt, kann das in dieser Variante erzeugte immersive Szenario überdies als eine Form der erweiterten Realität (Augmented Reality, im Folgenden: AR) gekennzeichnet werden [13].

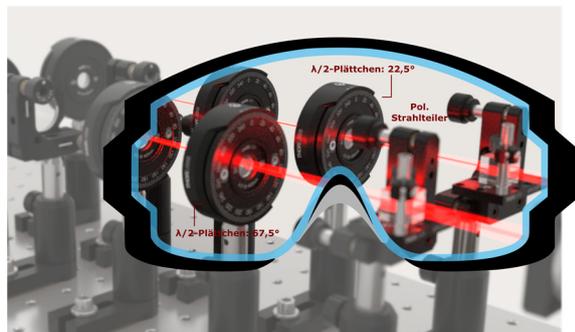


Abb.2: Darstellung der AR-Lernumgebung beim Blick auf das Realexperiment durch die AR-Brille.

4.2. Web3D-Applikation mit Realexperiment

In der Web3D-Anwendung wird der gesamte Experimentieraufbau detailgetreu digital nachgebildet und mit den gleichen Visualisierungen ausgestattet wie die AR-Lernumgebung (Abb. 3). In Form einer App wird die Web3D-Umgebung den Lernenden als Hilfe beim Arbeiten am realen Experiment auf einem Tablet-Computer oder Laptop zur Verfügung gestellt. Wie in der AR-basierten Variante sollen auch hier die technischen Möglichkeiten einer Kopplung zwischen den Visualisierungen und dem realen Aufbau ausgelotet werden, sodass es möglich werden könnte, dass sich eine Änderung der Einstellungen am Realexperiment dynamisch auf die Darstellungen innerhalb der Web3D-Anwendung auswirkt.



Abb.3: Darstellung der Web3D-Anwendung parallel zum realen Experiment.

Anders als in der AR-Variante sind reales Experiment und Web3D-Umgebung jedoch nicht räumlich deckungsgleich, sodass sich eine im Vergleich zur AR-Lernumgebung geringere räumliche Kontiguität ergibt. Da dennoch ein direkter, interaktiver Bezug zwischen den realen und digitalen Repräsentations-

formen angestrebt wird, kann in einem weiten Sinne auch diese Art der Implementierung als eine Form von MR-Lernumgebung bezeichnet werden [13].

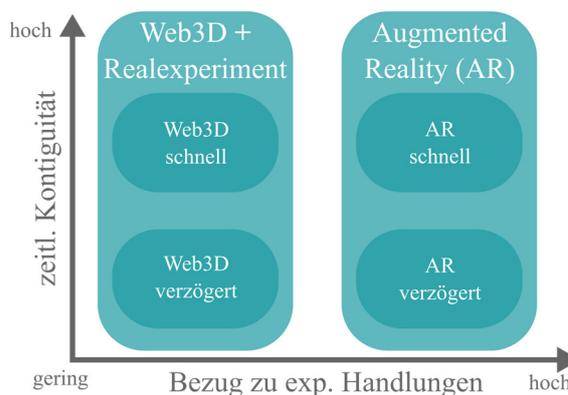


Abb.4: Darstellung der Vergleichsmöglichkeiten zur Untersuchung des Einflusses von zeitlicher Kontiguität innerhalb einer Lernumgebung und der Kopplung von Experiment und Visualisierungen zwischen den Lernumgebungen. Gemeinsame physische Grundlage der virtuellen Erweiterungen bildet jeweils das Realexperiment.

In der Konzeption der Studie bietet sich sowohl ein Vergleich zwischen den beiden skizzierten Lernumgebungen (und damit dem Grad der räumlichen Kontiguität), als auch ein Vergleich innerhalb einer Lernumgebung an, indem z. B. der Grad der zeitlichen Kontiguität variiert wird (Abb. 4). Der reale Experimentieraufbau als Grundlage aller experimentellen Handlungen bleibt dabei in allen denkbaren Konstellationen identisch.

5. Gestaltung der Lernumgebung

Die konkrete Ausgestaltung der Lernumgebung und der Experimente orientiert sich an den Rahmenbedingungen eines Versuchs im physikalischen Grundpraktikum. Da die Studierenden zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung in der Regel noch keinen Einführungskurs in Quantenphysik abgeschlossen haben, kann davon ausgegangen werden, dass sowohl wenig formal-mathematische Kenntnisse als auch klassisch-deterministisch dominierte Präkonzepte bei den Lernenden vorhanden sind. Es erscheint daher sinnvoll, inhaltlich ein Thema in den Blick zu nehmen, an dem der Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik besonders deutlich wird.

5.1. Inhaltliche Vorüberlegungen

Der enge Bezug auf einen experimentellen Anwendungskontext legt nahe, sich bei der inhaltlichen Strukturierung an den „Wesenszügen der Quantenphysik“, wie in [28] beschrieben, zu orientieren. In diesen Wesenszügen sind einige fundamentale, experimentell erschließbare Eigenschaften von Quantenobjekten zusammengefasst. Die folgenden Wesenszüge werden als zentrale zu vermittelnde Konzepte des Experiments in einer gegenüber [28] leicht abgewandelten Form zugrunde gelegt:

- **Komplementarität:** Bestimmte Größen (bspw. Polarisation in orthogonalen Basen) lassen sich nicht gleichzeitig bestimmen
- **Eindeutige Messergebnisse:** Durch die Wahl einer Messbasis ist das Ergebnis einer Messung in Bezug auf diese Basis eindeutig festgelegt.
- **Fähigkeit zur Selbstinterferenz:** Die Beschreibung eines Zustandes als Überlagerung verschiedener Basiszustände ein- und desselben Quantenobjektes.
- **Statistisches Verhalten:** Das Ergebnis einer Einzelmessung eines zuvor unbekanntes Zustandes ist prinzipiell nicht vorhersagbar. Umgekehrt lässt sich aus einer Einzelmessung grundsätzlich nicht auf den Zustand vor der Messung zurückschließen.

Es gibt eine Vielzahl denkbarer Experimente, anhand derer sich die Wesenszüge konkret darstellen lassen. Ein aus der klassischen Optik bekanntes und daher anschlussfähiges Thema ist die Polarisation von Licht. Zu den typischerweise in Polarisationsversuchen betrachteten Phänomenen gehören bspw. die Auslöschung der Intensität hinter zwei um 90° verdrehten Polfiltern, die Polarisationsdrehung durch Wellenplättchen oder die Winkelabhängigkeit der transmittierten Intensität (Malus' Gesetz). Schon in diesen einfachen Experimenten, die mit klassischem Licht durchgeführt werden können, können viele Wesenszüge zumindest in Analogiebetrachtungen charakterisiert werden. Daher sollen sie auch in der Durchführung im Grundpraktikum zur Heranführung an die Thematik zum Einsatz kommen.

Die genannten Phänomene lassen sich zudem auch in Experimenten mit einzelnen Photonen untersuchen, mit dem Unterschied, dass nicht mehr klassische Lichtintensitäten, sondern Transmissionshäufigkeiten, bzw. für das einzelne Photon Transmissionswahrscheinlichkeiten betrachtet werden. Darüber hinaus können im Einzelphotonenexperiment auch klassisch nicht beschreibbare, verschränkte Polarisationszustände erzeugt werden. Das Durchführen von Polarisationsexperimenten mit Einzelphotonen bildet daher den zweiten Teil der Experimentierphase.

5.2. Strukturierung der Konzepte

Durch das Fortschreiten von Experimenten mit klassischem Licht zu Polarisationsexperimenten an Einzelphotonen gerät insbesondere der Übergang von klassischen Intensitäten zu Wahrscheinlichkeiten, bzw. der Übergang von sehr vielen Photonen auf sehr wenige oder sogar einzelne Photonen in den Fokus. Auf beiden Ebenen lassen sich Aspekte der vier ausgewählten Wesenszüge darstellen. Daher scheint es sinnvoll, die einzelnen Wesenszüge weiter zu strukturieren, um jeweils den Unterschied einzelne/viele Photonen transparenter zu machen. Hierzu eignet sich das Vier-Quadranten-Schema [29], das den Übergang von vielen Photonen zu einzelnen

Photonen auf verschiedenen Repräsentationsebenen strukturiert (Abb. 5).

Zu jedem der Wesenszüge lassen sich sowohl geeignete experimentelle Aktivitäten mit einzelnen und vielen Photonen einbinden, als auch jeweils geeignete dynamische Visualisierungen für die MR-Lernumgebungen bereitstellen.

So bietet es sich an, in der Durchführung der Versuche mit einigen Experimenten zu grundlegenden Eigenschaften von (linear) polarisiertem Licht beim Durchgang durch einzelne Polfilter, Wellenplättchen oder polarisierende Strahlteilerwürfel zu starten und das Verhalten des Lichtes beim Durchgang durch die Komponenten zu charakterisieren. Schrittweise kommen dann weitere Komponenten hinzu, sodass am Ende der ersten Experimentierphase das Gesetz von Malus' mit klassischen Intensitäten in verschiedenen Messbasen gemessen werden kann. In der zweiten Hälfte des Versuchstages führen die Studierenden dann ein ähnliches Experiment mit einzelnen Photonen durch, indem sie die Reflexions- und Transmissionswahrscheinlichkeiten einzelner Photonen an einem polarisierenden Strahlteiler bestimmen. Den Abschluss bildet die Charakterisierung eines nicht-klassischen, d. h. verschränkten Zweiphotonenzustandes.

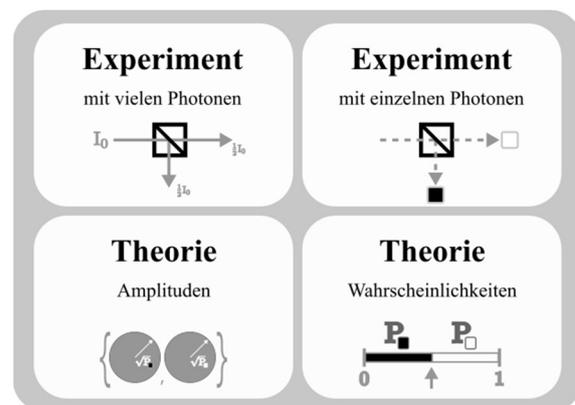


Abb.5: Vier-Quadranten-Schema zur Strukturierung der einzelnen Wesenszüge (nach [29]).

Das Vier-Quadranten-Schema (Abb. 5) dient nicht nur zur inhaltlichen Strukturierung der Polarisationsexperimente, sondern auch als Orientierung für den zu entwickelnden Konzepttest, anhand dessen das konzeptuelle Verständnis der Studierenden im Pre/Post-Vergleich gemessen werden soll.

5.3. Visualisierungen

Wie oben beschrieben eignet sich das Vier-Quadranten-Schema zudem zur Strukturierung der in den Lernumgebungen angebotenen Visualisierungen. Diese umfassen eine Vielzahl verschiedener Darstellungs- und Abstraktionsebenen.

Auf der Experimentebene reicht das Spektrum von einfachen Beschriftungen der Komponenten über geometrische Darstellung von Strahlengängen innerhalb des Aufbaus bis hin zur Echtzeit-Darstellung

von Messdaten, die wiederum auf verschiedene Weise grafisch aufbereitet werden können. Bspw. bieten sich einfache Plots von Intensität oder Zählrate gegen eingestellten Winkel der Messachse an. Bei Einzelphotonenereignissen kann ein Detektionsergebnis zudem durch einen akustischen ‚Klick‘ und ein Aufleuchten des Detektors dargestellt werden. Überblick über das Transmissions- oder Reflexionsverhalten weniger Photonen am Strahlteiler verschafft eine Schwarzweiß-Codierung [29] (Abb. 6). So kann anhand mehrerer Messergebnisse die relative Häufigkeit eines Messergebnisses als Schätzer für die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden. Auch die Korrelation zwischen zwei Messreihen kann durch Übereinanderlegen der erzeugten Muster visuell ermittelt werden.

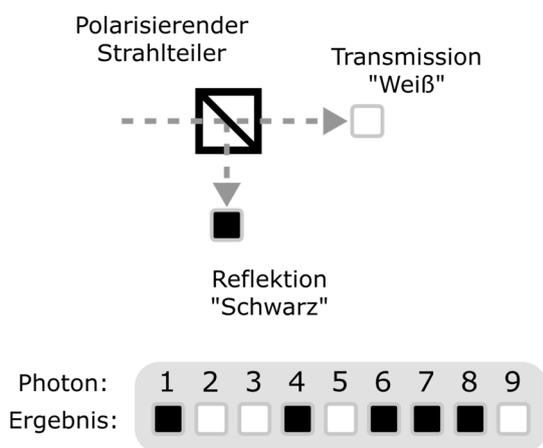


Abb.6: Codierung von Transmission und Reflexion einzelner Photonen am polarisierenden Strahlteiler durch schwarze und weiße Blöcke.

Die Visualisierungen der abstrakten, theoretischen Konstrukte sollten einerseits möglichst intuitiv und eingängig, andererseits aber streng mit der formal-mathematischen Darstellung kompatibel sein. Um dies zu gewährleisten, wird so weit wie möglich auf anerkannte und übliche Repräsentationsformen zurückgegriffen.

Bei Experimenten mit klassischem Licht sind hier in erster Linie vektorielle Darstellungen von Polarisationsrichtungen und die Darstellung von Intensitäten entlang des Strahlenverlaufs von Bedeutung. Beim Durchlaufen optischer Komponenten bietet die vektorielle Darstellung die Möglichkeit, Projektionen von Amplitudenvektoren auf Messachsen oder Drehungen durch Phasenverschiebungen in doppelbrechenden Materialien zu visualisieren.

Im Bereich der Einzelphotonenexperimente ist die Darstellung von Zuständen auf der Blochkugel eine übliche Darstellungsform, die für die zu entwickelnden Lernumgebungen übernommen werden soll (Abb. 7).

Bei der konkreten Einbindung der Visualisierung in die Lernumgebung ist zu beachten, dass die Blochkugeldarstellung im komplexen mathematischen Raum keinen Bezug zum realen, dreidimensionalen

Raum besitzt und daher nicht als örtlich lokalisierte Darstellung eines Photons missinterpretiert werden darf. Eine räumliche Zuordnung zu bestimmten Komponenten, wie in der Darstellung der klassischen Amplituden möglich, muss daher vermieden werden. Stattdessen kann der Einfluss bestimmter experimenteller Handlungen auf das Qubit bspw. im freien Raum oberhalb des gesamten experimentellen Aufbaus betrachtet werden.

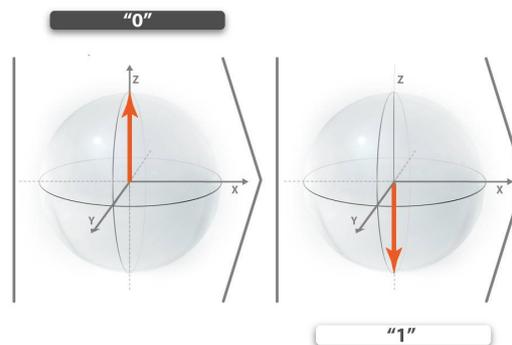


Abb.7: Darstellung von Zuständen eines Zwei Niveausystems (Qubit) auf der Blochkugel [30].

Die skizzierte Vielfalt der Darstellungen birgt das Potential einer Überforderung der Lernenden, wenn diese mit zu vielen Darstellungen auf einmal konfrontiert werden. Anhand des Vier-Quadranten-Schemas lassen sich in der Lernumgebung die aktuell dargestellten Visualisierungen in den Gesamtkontext des Versuches einordnen, indem sie einem der Quadranten zugeordnet werden (Abb. 8). Eine Darstellung des Schemas ähnlich Abb. 5 kann innerhalb der Lernumgebung als Advance Organizer genutzt werden. Zudem kann das Schema auch als interaktives Auswahlwerkzeug dienen, mit dem die Lernenden selbst die visuelle Darstellung umschalten können, indem sie einen anderen Quadranten auswählen.

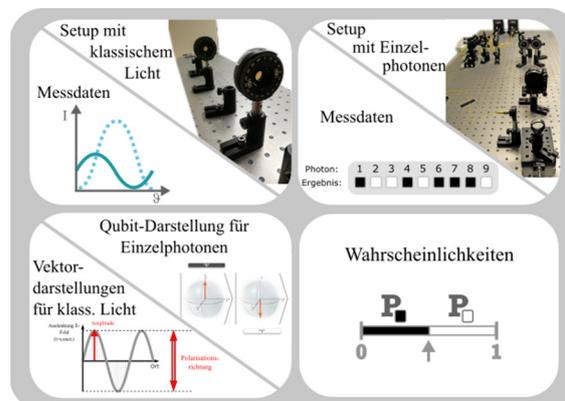


Abb.8: Zuordnung der Repräsentationsformen zu den Quadranten des in Abb. 5 dargestellten Schemas.

Die Details der Ausgestaltung von Visualisierungen und Nutzeroberfläche werden im Rahmen einer Usability- und Akzeptanzstudie durch die Koopera-

tionspartner der Wissenschaftsillustration evaluiert und gegebenenfalls vor der Untersuchung der didaktischen Fragestellungen angepasst. Nicht zuletzt ist hier das Ziel, die verwendeten Visualisierungen und die gesamte Lernumgebung ästhetisch ansprechend zu gestalten.

6. Erhebungsinstrumente

Auf Grundlage der in Abschnitt 3 erläuterten Überlegungen soll im Rahmen der empirischen Studie der Einfluss der Art der Lernumgebung (Realexperiment mit Web3D-Anwendung oder Realexperiment in der Erweiterten Realität), sowie des Grades an zeitlicher Kontiguität innerhalb der jeweiligen Lernumgebung auf das konzeptuelle Verständnis der Lernenden vor und nach der Durchführung der Experimente untersucht werden.

Zur Erhebung des konzeptuellen Verständnisses im Bereich der Quantenphysik gibt es bereits einige Testinstrumente, die jedoch hauptsächlich auf mathematisch-formalistische Aspekte der Quantenphysik abzielen (z. B. die Interpretation der Wellenfunktion oder Stetigkeits- und Potentialprobleme [31]). Daher wird für MiReQu die Neuentwicklung eines Konzepttests angestrebt, der sich an den Wesenszügen der Quantenphysik und dem Vier-Quadranten-Schema orientiert. Die dem Test zugrundeliegende Struktur kann auf verschiedene experimentelle Kontexte bezogen werden, z. B. neben Polarisationsexperimenten auch auf das Doppelspalt-Experiment oder Interferometrie-Experimente.

Zusätzlich zur sprachlichen Darstellungsebene ermöglicht der Bezug auf konkret vorstellbare Experimentiersituationen auch den Einbezug grafischer Darstellungen, z. B. von typischen Konfigurationen optischer Elemente. Diese Herangehensweise eröffnet zudem weitere Möglichkeiten der Testauswertung. So besteht die Möglichkeit neben der erreichten Punktzahl auch die visuelle Verarbeitung der Aufgaben mithilfe eines Eye-Tracking-Systems zu untersuchen, um unterschiedliche Problemlösungsstrategien zu identifizieren [32].

Aus der zugrunde liegenden kognitiven Theorie multimedialen Lernens ergibt sich zudem die Hypothese, dass der Lernerfolg unter anderem von der kognitiven Belastung der Lernenden während der Lernphase abhängt. Daher soll auch die kognitive Belastung während der Durchführung der Versuche bei den Lernenden erhoben werden.

Entscheidend ist hierbei die Differenzierung von intrinsischer, extrinsischer und nützlicher kognitiver Belastung anhand der erhobenen Daten [24]. Ziel der multimedialen Lernumgebung soll es sein, die unnötige kognitive Belastung zu reduzieren, aber gleichzeitig zu einem sinnvollen Einsatz der freien Ressourcen im Lernprozess anzuregen. Daher lassen sich aus der Differenzierung der verschiedenen Typen kognitiver Belastung in Verbindung mit dem zu entwickelnden Konzepttest Rückschlüsse auf die

Effektivität der beiden Lernumgebungen ziehen. Weitere Variablen, die als mögliche Einflussgrößen für das Abschneiden im Konzepttest berücksichtigt werden müssen, sind die allgemeinen kognitiven Fähigkeiten der Lernenden, deren Einstellung zum Thema Quantenphysik im Allgemeinen und ihre affektive Haltung während der Durchführung des Experimentes.

7. Zeitplanung und Ausblick

MiReQu startete im Wintersemester 2019/20 und ist über einen Zeitraum von drei Jahren angelegt. Schwerpunkt im ersten Jahr bildeten die Entwicklung der Web3D- und der AR-Lernumgebung durch die Abteilung Design der HAW-Hamburg in Zusammenarbeit mit der AG Schuck am Center for Nanotechnology (CenTech) Münster.

Die Entwicklung und Pilotierung des Konzepttests sind im Verlauf des Sommersemesters 2020 geplant. Im darauffolgenden Wintersemester werden die fertiggestellten Lernumgebungen im Rahmen einer Akzeptanz- und Usability-Studie durch die HAW Hamburg erstmalig untersucht und gegebenenfalls angepasst. Die Durchführung der Hauptstudie soll im Sommersemester 2021 mit ca. 130 Bachelor-Studierenden im dritten Fachsemester unter Federführung des Instituts für Didaktik der Physik der WWU Münster stattfinden. Sollte sich die Durchführung als Grundpraktikumsversuch als erfolgreich erweisen, könnte das Konzept anschließend an weiteren Standorten in Deutschland umgesetzt und die Datengrundlage so erweitert werden. Geplant ist zudem, die Web3D-Anwendung mittelfristig so auszubauen, dass die Komponenten modular zu einer Vielzahl virtueller quantenoptischer Experimente zusammengestellt werden können. Neben einem forschungsseitigen Beitrag zur empirischen Untersuchung multimedialer Lernumgebungen soll so auch ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Lehre in der Quantenphysik und den physikalischen Praktika geleistet werden.

8. Literatur

- [1] Johnston, I. D.; Crafword, K.; Fletcher, P. R. (1998): Student Difficulties in learning quantum mechanics. In: *International Journal of Science Education*, 20(4), S. 427-446.
- [2] Schlosshauer, M.; Kofler, J.; Zeilinger, A. (2013): A snapshot of foundational attitudes towards quantum mechanics. In: *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 44(2), S. 222-230.
- [3] Baily, C.; Finkelstein, N. D. (2010): Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. In: *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 6(1), 010101.
- [4] Baily, C.; Finkelstein, N. D. (2009): Development of quantum perspectives in modern phys-

- ics. In: *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 5(1), 010106.
- [5] Manila, K.; Koponen, I. T.; Niskanen, J. A. (2002). Building a picture of students' conceptions of wave- and particle-like properties of quantum entities. In: *European Journal of Physics*, 23(1), S. 45–53.
- [6] Ayene, M.; Krick, J.; Ingerman, A.; Thacker, B. (2019): A Holistic Picture of Physics Student Conceptions of Energy Quantization, the Photon Concept, and Light Quanta Interference. In: *International Journal of Science and Mathematics Education*, 17(6), S. 1040-1070.
- [7] Müller, R.; Wiesner, H. (2002): Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: *American Journal of Physics*, 70(3), S. 200–209.
- [8] Zollman, D. A.; Rebello, N. S.; Hogg, K. (2002): Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. In: *American Journal of Physics*, 70(3), S. 252–259.
- [9] Kohnle, A.; Douglass, M.; Edwards, T. J.; Gillies, A. D.; Hooley, C. A.; Sinclair, B. D. (2010): Developing and evaluating animations for teaching quantum mechanics concepts. In: *European Journal of Physics*, 31(6), S. 1441–1455.
- [10] Kohnle, A.; Baily, C.; Campbell, A.; Korolkova, N.; Paetkau, M. J. (2015): Enhancing student learning of two-level quantum systems with interactive simulations. In: *American Journal of Physics*, 83(6), S. 560–566.
- [11] Malgieri, M.; Onorato, P.; Ambrosis, A. de (2014): Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations. In: *European Journal of Physics*, 35(5), 55024.
- [12] Krijtenburg-Lewerissa, K.; Pol, H. J.; Brinkman, A.; van Joolingen, W. R. (2017): Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. In: *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010109.
- [13] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F. (1994): Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Das, H. (Hrsg.): *Telemanipulator and Telepresence Technologies. Photonics for Industrial Applications*. Boston: SPIE Proceedings, S. 282-292.
- [14] Scholz, R.; Friege, G.; Weber, K.-A. (2018): Undergraduate quantum optics: experimental steps to quantum physics. In: *European Journal of Physics*, 39(5), 005301.
- [15] Bronner, P. (2010): *Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons*. Berlin: Logos.
- [16] Beck, M. N.; Beck, M. (2016): Witnessing Entanglement in an undergraduate laboratory. In: *American Journal of Physics*, 84(2), S. 87-94.
- [17] Kwiat, P. G.; Mattle, K.; Zeilinger, A.; Sergienko, A. V.; Shih, Y. (1995): New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs. In: *Physical Review Letters*, 75(24), S. 4337-4341.
- [18] Dounas-Frazer, D.; Lewandowski, H.J. (2018): The Modelling Framework for Experimental Physics: description, development, and applications. In: *European Journal of Physics* 39(6), 0064005.
- [19] 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 laboratory to foster the concepts of heat conduction. In: *European Journal of Physics* 39(3), 035703.
- [20] Shaikh, U. A. S.; Magana, A. J.; Neri, L.; Escobar-Castillejos, D.; Noguez, J.; Benes, B. (2017): Undergraduate students' conceptual interpretation and perceptions of haptic-enabled learning experiences. In: *International Journal of Technology in Higher Education*, 14(15).
- [21] Akçayır, M.; Akçayır, G.; Pektaş, H. M.; Ocak, M. A. (2016): Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories. In: *Computers in Human Behaviour*, 57, S. 334-342.
- [22] Mayer, R. E. (2014): *Cognitive Theory of Multimedia Learning*. In: Mayer, R. E. (Hrsg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, S. 43-71.
- [23] Schnotz, W.; Bannert, M. (2003): Construction and interference in learning from multiple representation. In: *Learning and Instruction*, 13(2), S. 141-156.
- [24] Sweller, J.; Ayres, P.; Kalyuga, S. (2011): *Cognitive Load Theory*. New York, Dodrecht, Heidelberg, London: Springer.
- [25] Mayer, R. E. (2017): Using multimedia for e-learning. In: *Journal of Computer-Assisted Learning*, 33(5), S. 403-423.
- [26] Laumann, D. (2017): Integrativer Einsatz realer und interaktiver digitaler Repräsentationen in der Physik. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1(2017), S. 251-256. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/752/904> (Stand 4/2020)
- [27] Mayer, R. E.; Fiorella, L. (2014): Principles for Reducing Extraneous Processing in Multimedia Learning: Coherence, Signaling, Redundancy, Spatial Contiguity, and Temporal Contiguity Principles. In: Mayer, R. E. (Hrsg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, S. 279-315.

- [28] Müller R.; Küblbeck, J (2002): Wesenszüge der Quantenphysik – Modelle, Bilder, Experimente. Köln: Aulis Verlag Deubner.
- [29] Heusler, S. (2013): Visualisierungen - ein Schlüssel zu moderner Physik im Schulunterricht. Münster: SCIENCEeMOTION. Url: <http://www.sciencemotion.de/wp-content/uploads/Visualisierungen-Physik.pdf> (Stand 04/2020).
- [30] Dür, W.; Heusler, S. (2012): Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. In: PhyDid A, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1(2012), S. 01-16. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/311> (Stand 04/2020).
- [31] Cataloglu, E.; Robinett, R. W. (2002): Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. In: American Journal of Physics, 70(3), S. 238-251.
- [32] Klein, P.; Lichtenberger, A.; Küchemann, S.; Becker, S.; Kekule, M.; Viiri, J.; Baadte, C.; Vaterlaus, A.; Kuhn, J. (2020): Visual attention while solving the test of understanding graphs in kinematics: an eye-tracking analysis. In: European Journal of Physics, 41(2), 025701.

Hinweis auf Förderung durch das BMBF

Das Projekt MiReQu wird im Rahmen des Förderbereichs „Förderung von Forschung zur digitalen Hochschulbildung – Disziplin- und fachbezogene Hochschulbildung“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.