Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

Schlussbericht

Teil II

Hochschule Niederrhein

QuFabLab

Teilvorhaben: HSNR- Bildungsplattform und haptische Benutzerschnittstellen

Berichtszeitraum 01.12.2021 – 31.08.2025

Gefördert vom

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Zuwendungsempfänger:	Hochschule Niederrhein
Vorhabenbezeichnung:	QuFabLabs
Förderkennzeichen:	13N15998

Dieses Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Dokumenteninformation	
Dokumententyp:	Öffentlicher Bericht
Datum (Tag der Fertigstellung):	27.02.2026
Autoren:	Prof.in Dr. Gudrun Stockmanns, Prof. Dr. Edwin Naroska, Lukas Cramer, Lucas Klauth, Dagmar Schumacher, Martina Braun
Dokumenteninhalt:	Das vorliegende Dokument beinhaltet den Sachbericht zum Abschluss des Projektes

Inhaltsverzeichnis

VORWORT 6

1 WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ERGEBNISSE UND WEITERE WESENTLICHE EREIGNISSE 8

1.1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse 8

1.1.1 AP 0 Projektkoordination 8

1.1.2 AP 3 Virtuelles QuFabLab 8

1.1.3 AP 4 Entwicklung offener Lernmaterialien und didaktischer Makro- und Funktionsmodelle 27

1.1.4 Workshops zur Evaluation der AR- und VR-Anwendung 40

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 49

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten 49

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses 50

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 52

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Systemlandschaft Lernplattform 10
Abbildung 2 Eine alte (links) und die aktuelle Version der Moodle-Kurs Startseite 11
Abbildung 3 Gruppenauswahl für Nutzer 11
Abbildung 4 Auswahl des Niveaus bzgl. Vorwissen 12
Abbildung 5 Auszug dem Kursteil Grundlagen der Mathematik 13
Abbildung 6 Auszug aus dem Kursteil Grundlagen der Quantenphysik 13
Abbildung 7 Auszug Folien aus dem Kursteil Quantentechnologie und Sensorik 14
Abbildung 8 Auszug Folien aus dem Kursteil Quantentechnologie und Sensorik 14
Abbildung 9 Auszug aus dem Kursteil Anwendung von Quantensensoren 15
Abbildung 10 Auszug aus dem Kursteil Anwendung von Quantensensoren 15
Abbildung 11 Auszug aus dem Kursteil Experimente. Hier ist ein Video des VR-Experiments zum Michelson-Interferometers dargestellt 16
Abbildung 12 Auszug aus dem Kursteil Experimente: Hier wird ein Foto des AR-Experiments zum Michelson-Interferometers gezeigt 16
Abbildung 13 Auszug aus dem Kursteil Glossar 17
Abbildung 14 Auszug aus dem Forum des Kurses 17
Abbildung 15 Auszug des Feedbackfragebogens des Moodle Kurses 18
Abbildung 16 Lernpfadmodell 19
Abbildung 17 Beispiel Lehrmaterial: Einführung Sensorik 20
Abbildung 18 Quantum Sensor Tutor Startseite 22
Abbildung 19 Auswahl Wissensniveau 22
Abbildung 20 Ausstellungsstand DG BMT Kongress 24
Abbildung 21 Workshop auf DG BMT Kongress 2023 25
Abbildung 22 Umfrageresultate, welche Lernform gewünscht ist 25
Abbildung 23 Umfrageresultate, welche Lehrmaterialien gewünscht sind 26
Abbildung 24 Flyer zur Verbreitung des Online-Lernangebotes 26
Abbildung 25 Das Ghost Imaging Experiment in VR 28
Abbildung 26 Darstellung des Michelson-Interferometers in VR. Grün markiert ist die Anleitung, wo der nächste Stein zu platzieren ist 29
Abbildung 27 Fehleranzeige, wenn ein Spielstein die falsche Rotation oder den falschen Typ hat 30
Abbildung 28 Startbildschirm Michelson Interferometer 30
Abbildung 29 Hier ist die Durchführung des Michelson-Interferometer Experiments in reiner VR zu sehen 31
Abbildung 30 Konzept DIY Quantenkoffer “Holz-Version” 34
Abbildung 31 CAD-Ansicht der haptischen Artefakte auf einem “Spielbrett” 34
Abbildung 32 Iterationen an Bausteinen. Aktueller Baustein des AR-Aufbaus, Holzversion des AR-Aufbaus und echter Stein des Quantenkoffers 34
Abbildung 33 Ausschnitt aus dem Spielbrett (zu sehen sind vier Felder mit jeweils fünf Löchern die später die Magnete aufnehmen werden sowie den Kontaktfelder zur Erfassung der Position und Ausrichtung der einzusetzenden Spielsteine) 36
Abbildung 34 Das Displayfeld eines Spielsteins in der Draufsicht 36
Abbildung 35 Die AR-Anwendung, während der Laserstrahl durch das Interferometer läuft 38
Abbildung 36 Schulklasse beim Workshop 41
Abbildung 37 Schüler:in bei der Durchführung der Experimente mit reiner VR (links) und AR (rechts) 42

Abbildung 38 Durchführung des klassischen Michelson-Interferometers Experiments der mit den von der HRW entwickelten Versuchsaufbau..... 42
Abbildung 39 Ablaufschema des Workshops 43
Abbildung 40 Auszug aus dem Wissenszuwachsteil des Fragebogens..... 44
Abbildung 41 Gruppenauswahl des Fragebogens..... 44
Abbildung 42 Bewertungsskala für die AR- und VR-Anwendung..... 45
Abbildung 43 Auf der X-Achse sind die Gruppen klassisch, VR und AR.Auf der Y-Achse von a) und b) sind die Differenzen zwischen vorher/nachher des Theorieteils (-4 bis +4 Skala) Auf der Y-Achse der Plots c) bis h) sind die Bewertungen von den Probanden auf einer 0-5 47
Abbildung 44 Informationsstand mit Ausstellung des QuFabLabs AR-Systems bei den HSNR Engineering Days 2026..... 50

VORWORT

Der Maschinen- und Anlagenbau mit mehr als 6.600 meist kleinen und mittelständischen Unternehmen und mehr als einer Mio. Beschäftigten gehört zu den Schlüsselbranchen der deutschen Industrie. Hier ist festzustellen, dass die Technologie und das damit verbundene Potenzial der Quanten Technologie noch nicht in den Unternehmen ausreichend bekannt ist und Aufklärungsbedarf besteht. Ebenso ist noch nicht ausreichend Fachpersonal existent, um die Potenziale heben zu können.

Ziel des Projektes „Quantum Technology FabLabs“ war es daher ein wirkungsvolles und skalierbares Bildungs- und Kollaborationsökosystem mit dem Fokus auf „Sensorsysteme der 2. Quantengeneration im Maschinen- und Anlagenbau“ zu etablieren.

Klassische stationäre FabLabs sind sehr gut geeignet, um die Bildung in diesem Themenbereich zu fördern. Leider sind sie nur bedingt für einen großen Kreis an Interessierten erreichbar, daher ist eine zusätzliche Bildungskomponente sinnvoll, welche mobil und online verfügbar ist.

Weiterhin gibt es noch keine umfassende allgemein zugängliche OER (Open Educational Resources) Plattform, um den Zugang zu den passenden Lernmaterialien zu erleichtern. Während es im Bereich der klassischen Bildung z.B. an Universitäten entsprechende Studiengänge mit Inhalten aus der Quantenphysik gibt, ist eine wesentliche Lücke ist die niedrigschwellige und anwendungsorientierte Aus- und Weiterbildung, insbesondere im Unternehmenskontext. Im Umfeld der schwer verständlichen Quanten-Technologie stellt das Fehlen von einfach zu begreifenden Erklärungen und Darstellungen eine besondere Barriere dar. Es bedarf somit einer nutzerzentrierten Ausbildungskomponente, die das Lernen erleichtert und die Motivation des Nutzers aktiviert und aufrechterhält.

Das Teilprojekt “HSNR - Bildungsplattform und haptische Benutzerschnittstellen” hatte daher die Aufgabe, das Begreifen der Technologien nachhaltig und effektiv zu fördern und somit das Gesamtsystem bei der Fachkräftegewinnung und Kompetenzvermittlung zielgruppenorientiert zu unterstützen. Zur Vergrößerung der Reichweite war es Aufgabe der HSNR das stationäre Angebot um ein virtuelles Quantum Technology FabLab als online Bildungs- und Kollaborationsumgebung zu erweitern. Dazu wurde eine Online-Bildungsplattform geschaffen, die allen Interessierten zur Verfügung gestellt und OER Angebote zusammengetragen, um virtuelle Varianten erweitert und auch neue geschaffen. Als innovativer Ansatz wurden von der HSNR Artefakte entwickelt, welche eine haptische Ergänzung zu den Lernmaterialien bilden und so den Lerneffekt positiv beeinflussen sollen. Auch diese haptischen Artefakte sowie die dazugehörigen Lerneinheiten werden als OER zur Verfügung gestellt. Über diese Erweiterung der Bildungsplattform werden innovative OER allgemein zugänglich und so für eine Vielzahl von Interessierten erreichbar.

Für das Gesamtverbundprojekt bedeutete die Rolle des HSNR Teilvorhabens die Chance, weitere Erfahrungen in der Lehre unter Nutzung innovativer Konzepte zu sammeln und so den Erfolg der Kompetenzvermittlung zu erhöhen und die Fachkräftegewinnung dauerhaft zu unterstützen. Die Online-Plattform arbeitet als Ergänzung zum stationären Quantum Technology FabLab: So können Interessierte zunächst für aktuelle neue quanten-basierte Technologien im stationären Quantum Technology FabLab aufgeschlossen werden und im

Nachgang kann dauerhaft ein Erleben und Erfahren der Technologien auch von zuhause oder vom Arbeitsplatz aus ermöglicht werden. Weiterhin fungiert die Online-Plattform auch als erste Anlaufstelle für Interessierte und als Verbreitungsplattform für die OERs.

Da die Arbeitsergebnisse als OER (Open Educational Resources) entwickelt werden, können sie somit ebenfalls in anderen Kontexten eingesetzt und verwertet werden. Die Verstetigung durch die beteiligten Projektpartner ermöglicht zudem Fortbestehen und Erweiterung der Einsatzbereiche über das Projektende hinaus.

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Projektaktivitäten der Hochschule Niederrhein im Teilprojekt “Bildungsplattform und haptische Benutzerschnittstellen” in Anlehnung an die geplanten Arbeitspakete beschrieben und eventuelle Abweichungen von der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung dargelegt.

1 WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ERGEBNISSE UND WEITERE WESENTLICHE EREIGNISSE

1.1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse der Projekttätigkeit im Projektzeitraum beschrieben. Die Hochschule Niederrhein war insbesondere in das Arbeitspaket 3: „Aufbau, Weiterentwicklung und Betrieb eines virtuellen Quantum Technology FabLabs als online Kollaborations- und Bildungsumgebung“ und Arbeitspaket 4: „Entwicklung offener Lernmaterialien und didaktischer Makro- und Funktionsmodelle“ involviert und leitete diese. In dem Berichtszeitraum war die Hochschule Niederrhein deshalb in den Arbeitspaketen (AP) AP3 und AP4 tätig, wurde aber auch im AP0: Projektleitung und -koordinierung aktiv.

1.1.1 AP 0 Projektkoordination

Die HSNR interne Projektorganisation wurde aufgesetzt und bis zum Projektende weitergeführt, Zwischenberichte und die Zahlungsanforderungen, Zwischennachweise, ein Projektverlängerungsantrag und mehrere Umwidmungsanträge wurden erstellt. Die Projektmitarbeiter:innen nahmen an QuFabLabs Meetings, Telefonkonferenzen, (virtuellen) Statusmeetings sowie Arbeitsgruppentreffen teil. Die zu leistenden Arbeiten wurden mit den beteiligten Konsortialpartner:innen abgestimmt und es fand eine interdisziplinäre Zusammenarbeit statt.

1.1.2 AP 3 Virtuelles QuFabLab

AP3: Aufbau, Weiterentwicklung und Betrieb eines virtuellen Quantum Technology FabLabs als online Kollaborations- und Bildungsumgebung

Das Arbeitspaket ist in insgesamt 6 Unterarbeitspakete UAP3.1 bis UAP3.6 unterteilt.

UAP3.1: Recherche, Sichtung und Bewertung verfügbarer Software-Komponenten und Erstellung der Gesamtarchitektur für die Plattform

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Recherche und Sichtung möglicher geeigneter Softwarekomponenten für eine Kollaborations- und eine Bildungsumgebung. Dabei wurde unterschieden in eine Kollaborationsplattform, welche die Zusammenarbeit von Interessierten und Experten in virtueller Umgebung zeitgleich und zeitversetzt ermöglicht sowie einer Bildungsplattform, auf der Interessierte Zugriff auf OER, Experimente und weitere Lernmaterialien erhalten können. Nach der Sichtung und Auswertung einer dazu durchgeführten Bachelorarbeit zum Thema “Zielgruppenspezifische Wissensvermittlung im Kontext

komplexer Technologien am Beispiel der Quantensensorik" wurden die Alternativen bewertet und final die Plattform Moodle ausgewählt. Die virtuelle Kollaborationsplattform wurde in Moodle integriert.

UAP3.2: Planung der Kollaborations- und Bildungs-Plattform

Die in UAP 3.1 erzielten Ergebnisse wurden in einer Skizze dokumentiert und im Konsortium abgestimmt. Das Ergebnis beruht auf der Erhebung der Anforderungen an die Plattform und der größtmöglichen Abdeckung dieser Anforderungen. Parallel wurden erste Schritte bezüglich der Veröffentlichung von Workshopangeboten unternommen.

Im Rahmen einer betreuten Bachelor-Arbeit und weiteren Untersuchungen vom Projektteam wurden die ersten Ansätze der Umsetzung der Bildungsplattform vollzogen und weiterentwickelt. Dabei wurde insbesondere untersucht, wie mit Moodle die zentralen Anforderungen Lehrmaterialien zielgruppen- und kompetenzlevelspezifisch angeboten werden kann sowie ob und wie Schnittstellen zu externen OER-Plattformen wie z.B. ORCA, MUMIE oder OERSI integriert werden können.

Wichtig in diesem Zusammenhang war auch die Berücksichtigung des Datenschutzes und eines niederschwelligen Zugangs zum Portal. Ergebnis der Untersuchung war, dass mit der aktuellen Version von Moodle die Anforderungen umgesetzt werden können. Probleme wurden aber bei der eigentlich angestrebten Integration der Moodle-Seiten in die HSNR-eigene Moodle-Plattform aufgedeckt, da die HSNR eine ältere Softwareversion nutzt und zudem nicht ohne weiteres anonyme Accounts für externe Besucher erzeugt werden können. Nach Einführung einer neueren Softwareversion an der HSNR konnten aber Gäste-Accounts erstellt werden.

UAP3.3: Aufbau der Kollaborations- und Bildungs-Plattform

Das Projektteam stellte einen Umsetzungsplan zum Aufbau der Plattform auf und stimmte sich mit den Konsortialpartnern über deren Zuarbeiten ab. Der Server wurde eingerichtet, um die erforderlichen Server-Kapazitäten zur Verfügung zu haben. Auf diesem Server läuft die moodle Instanz in einem Docker Image. Ziel war das Verbleiben in der Hochschule Niederrhein, um insbesondere die Datensicherheit zu gewährleisten. Aufgrund der Anforderungen an die Moodle-Plattform musste aber von einer direkten Nutzung des HSNR-Moodle-Systems Abstand genommen und stattdessen ein eigener Moodle-Server aufgesetzt werden. So konnte die neuste Moodle-Version mit den entsprechend benötigten Features genutzt werden. Zudem ist es so auch möglich, die Moodle-Plattform so zu konfigurieren, dass die Moodle-Inhalte von Suchmaschinen indiziert werden können, was eine wichtige Anforderung zur Verbreitung der Inhalte ist.

Ein weiterer Vorteil des Ansatzes ist, dass dadurch die Moodle-Plattform insgesamt zum Download angeboten werden kann und so andere an dem Thema Interessierte sie als Grundlage nutzen können, um eigene modifizierte oder auch neue Inhalte anzulegen. Dies ist

insbesondere z.B. für Firmen interessant, die so eigene firmenspezifische Themen ergänzen können.

Auf der Lernplattform Moodle wurden folgende Funktionen implementiert:

1. Benutzerkonten anlegen und verwalten
2. Inhalte bereitstellen und zugänglich machen
3. Kurse und Gruppen für unterschiedliche Kompetenzlevel anlegen und verwalten
4. Webinhalte einpflegen und bereitstellen
5. Dokumente und Medieninhalte einpflegen und bereitstellen
6. Wissensstandabfragen durch Quizze möglich
7. „Lernfeedback durch verschiedene Übungen“
8. Bereitstellen der Inhalte, über Datenbankstruktur, auch an dritte Programme (AR/VR)
    - REST-API
    - SQL-Queries.

Das Projektteam baute die Plattform auf und füllte die Lernplattform mit Lernmaterialien.

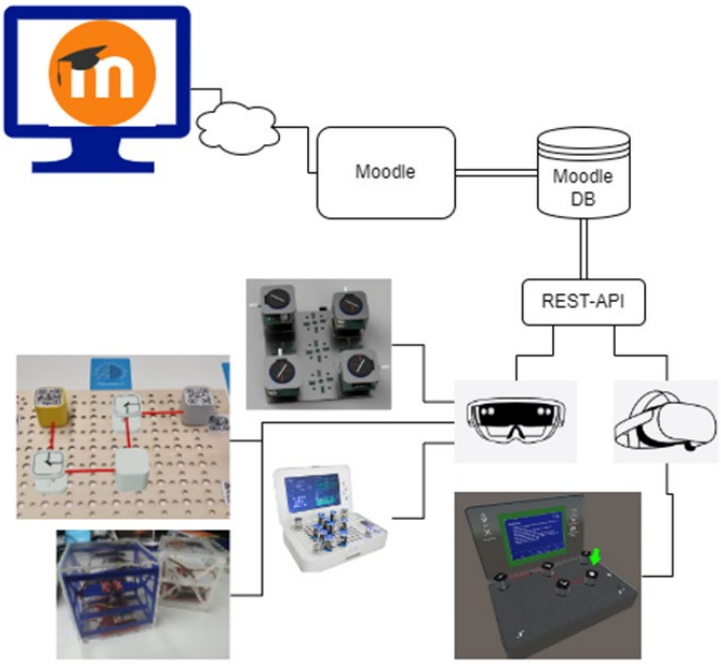


Abbildung 1 Systemlandschaft Lernplattform

Eine Moodle-API zum Abrufen von verschlagworteten Inhalten aus der Lernplattform wurde eingerichtet. Ebenso wurde die Moodle-Datenbank mit eigener API versehen, um Quizzes und Lerninhalte auch aus der VR/AR Welt zugreifbar zu machen.

Die Nutzeroberfläche wurde stetig den Erweiterungen angepasst und optisch ansprechender gestaltet. Abbildung 2 zeigt links eine erste Version der Oberfläche und rechts die aktuelle Ansicht.

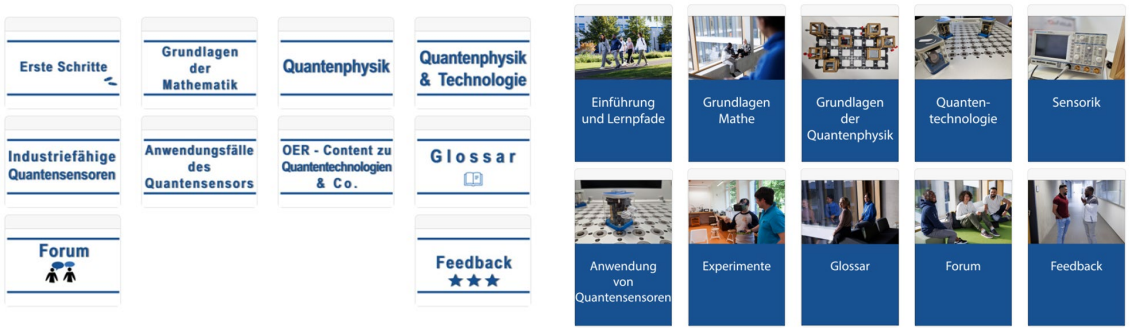


Abbildung 2 Eine alte (links) und die aktuelle Version der Moodle-Kurs Startseite

Über die Kacheln der Startoberfläche gelangen die Nutzenden zu Beschreibungen über die Inhalte der jeweiligen Lernkachel, Lernmaterial in Form von Foliensätzen, Textdateien, Videos, Links zu anderen OER Plattformen, Trainings, Tests und Quizzes. Im Folgenden werden die Inhalte der verschiedenen Abschnitte/Kacheln kurz beschrieben.

Einführung und Lernpfade

Hier können die Nutzenden eine Auswahl treffen, welcher Nutzendengruppe sie angehören. Nach der Auswahl werden die Zugriffe auf die Inhalte gesteuert.

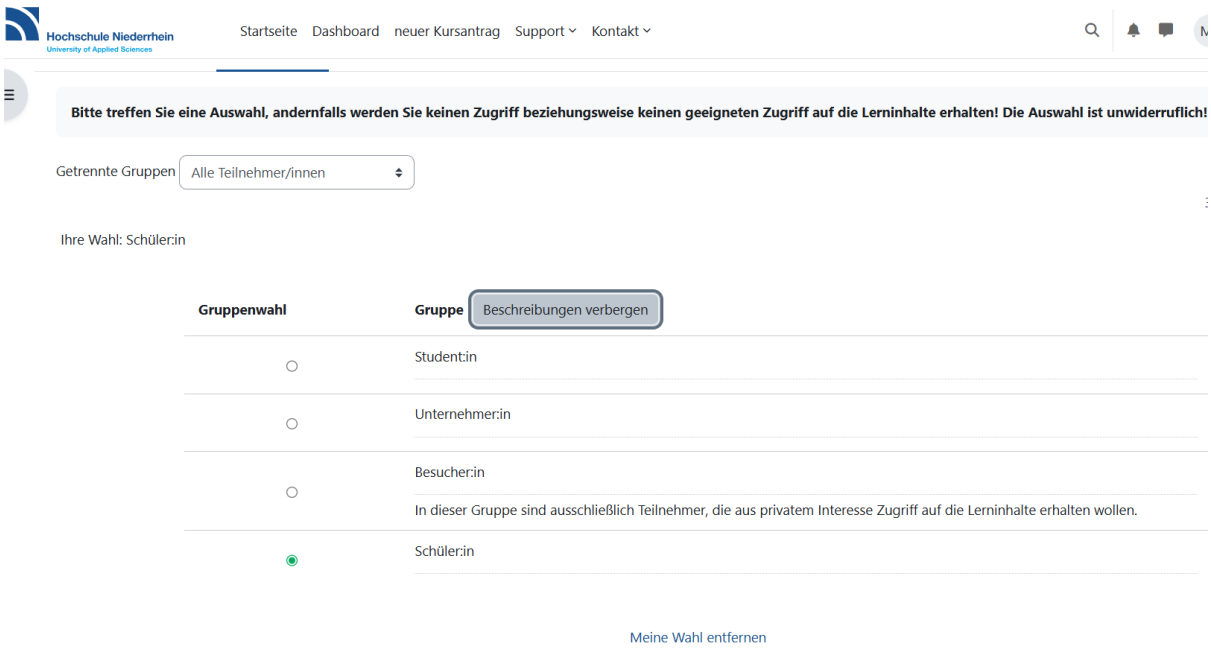


Abbildung 3 Gruppenauswahl für Nutzer

Im zweiten Schritt können Niveauangaben getätigt werden, welche dann ebenso Einfluss auf die sichtbaren Lerninhalte haben, um zum Beispiel Anfänger nicht mit komplizierten Lerninhalten zu konfrontieren und über einen leichten Einstieg die Motivation zu erhalten.

Abbildung 4 Auswahl des Niveaus bzgl. Vorwissen

Grundlagen Mathe

Dieser umfängliche Lernbereich wurde integriert, um Grundlagen für das Verständnis der Quantenphysik zu schaffen. Ohne ein gewisses Maß an Wissen in diesem Bereich ist das weitergehende Erfassen der Quantensensorik nur schwer möglich.

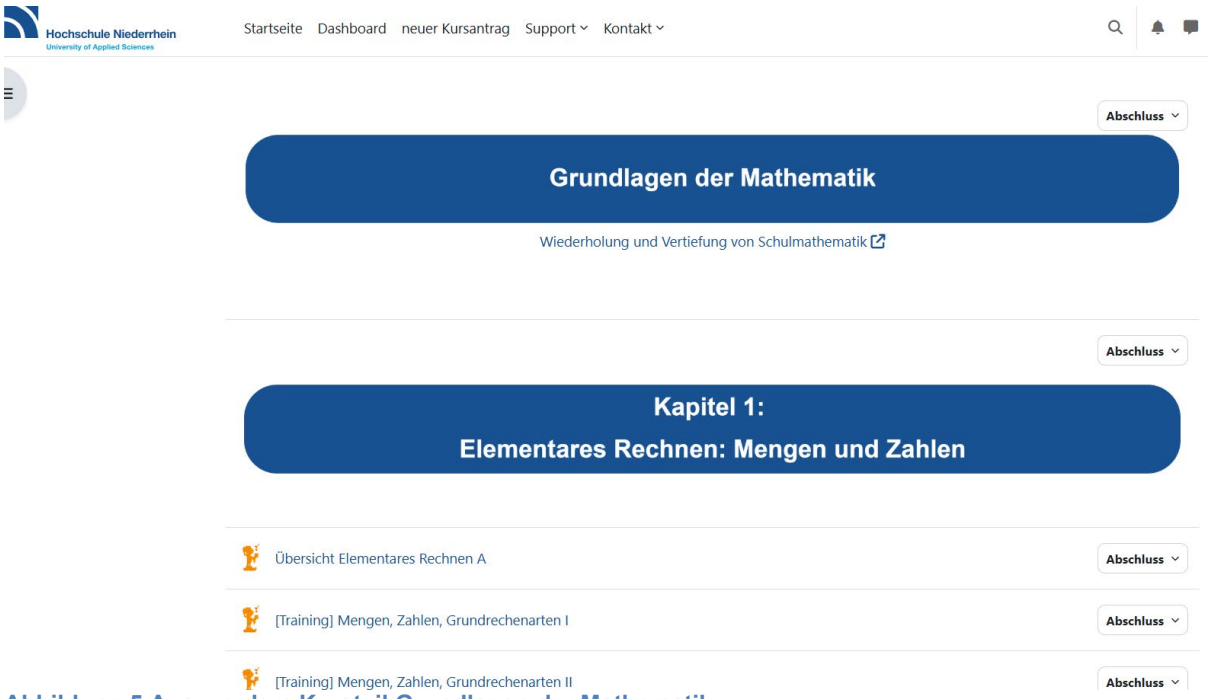


Abbildung 5 Auszug dem Kursteil Grundlagen der Mathematik

Grundlagen der Quantenphysik

Hinter der Kachel Grundlagen der Quantenphysik verbergen sich Lernangebote als weitere Basis für das Verständnis der Quantensensorik. Hier werden insbesondere Lernmaterialien unterschiedlichen Vorwissensniveaus in Videoform eingesetzt, um das Lernen attraktiv zu gestalten.

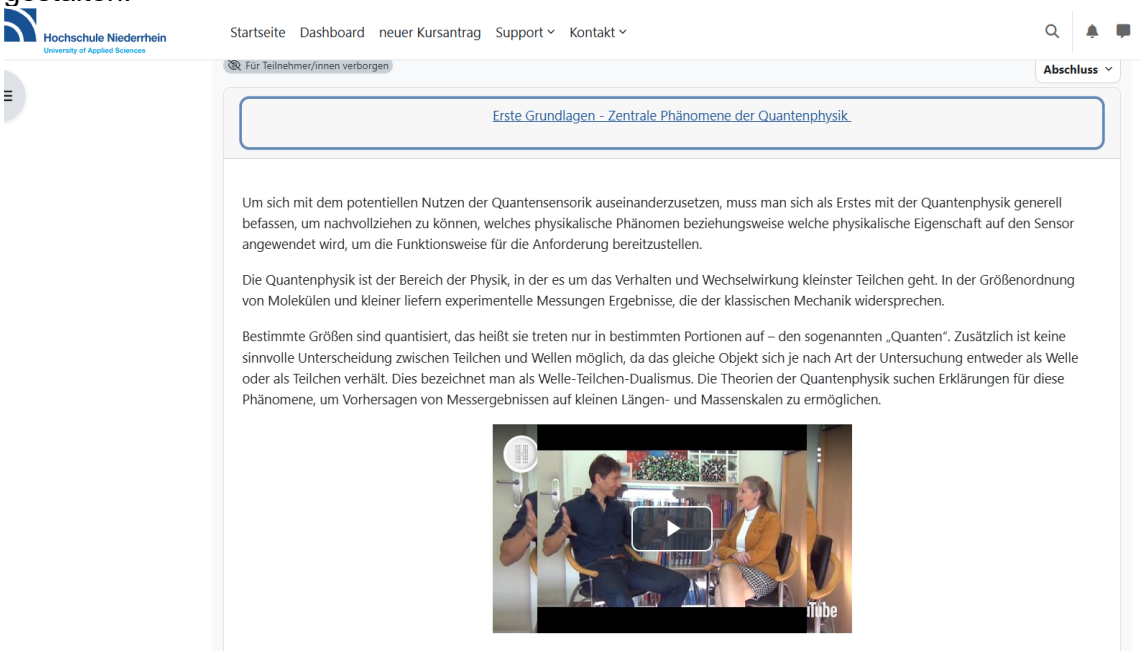


Abbildung 6 Auszug aus dem Kursteil Grundlagen der Quantenphysik

Quantentechnologie und Sensorik

Hier werden Foliensätze, welche als OER von den Projektpartner:innen erstellt wurden, als Lernmaterial eingesetzt.

Optische Detektoren

Übersicht Halbleiterdetektoren

Trifft Licht auf einen optischen Halbleiterdetektor, entstehen durch den inneren Photoeffekt ein Strom. Wird dieser Strom gemessen, lässt sich dadurch auf die Bestrahlungsstärke schließen. Hier eine Übersicht der gängigen Detektoren:

Photodiode
Die Photodiode ist der wohl am häufigsten verwendete Detektor und bildet die Grundlage der optischen Halbleiterdetektoren. Sie lässt sich günstig und rauscharm fertigen und kommt daher in der faseroptischen Kommunikation zum Einsatz. Mit Photodioden sind hochauflösende 2D-Arrays realisierbar, weshalb man sie in digitalen Kameras in Form von CCD-Chips wiederfindet.

Photodioden verfügen über keine interne Verstärkung des Photostroms und können deshalb nicht für die Detektion von Einzel-Photonen verwendet werden.

Avalanche Photodiode (APD)
Die Lawinenphotodiode verfügt über eine interne Verstärkung, die sich durch eine externe Spannung steuern lässt. Sie können schnell auf schwache Signalveränderungen reagieren und finden sich daher in der Hochgeschwindigkeits-faseroptischen Kommunikation, der Entfernungsmessung mit Laserpulsen und in der medizinischen Bildgebung wieder. Bislang haben APDs eine geringere Pixeldichte als Photodioden und sind eher in 1D-Arrays implementiert.

Die interne Verstärkung macht eine APD sensitiver, allerdings reicht die typische Energie eines einzelnen Lichtteilchens nicht aus, um über dem Rauschniveau einer APD zu liegen.

Abbildung 7 Auszug Folien aus dem Kursteil Quantentechnologie und Sensorik

Begriffsdefinitionen

- Sensor wandelt physikalische Größe in elektrisches Signal um
- Vorverarbeitung durch aktive Messchaltung (z.B. Messverstärker) in normiertes Signal
- Digitalisierung und digitale Signalverarbeitung in einem Mikrocontroller
- Anpassung und Bereitstellung der Information über Bus- oder Drahtlosschnittstelle

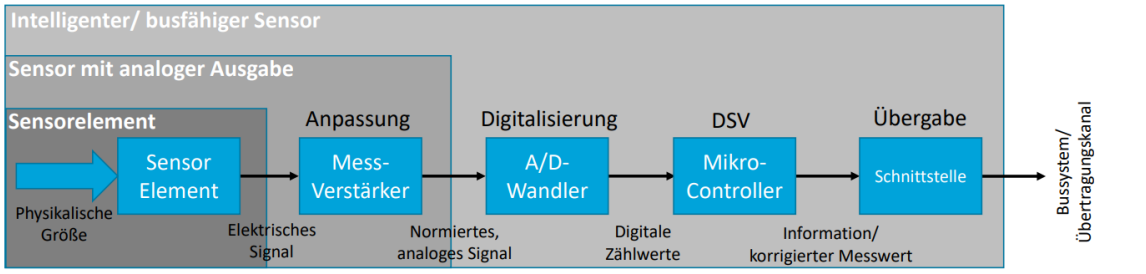


Abbildung 8 Auszug Folien aus dem Kursteil Quantentechnologie und Sensorik

Anwendung von Quantensensoren

Hier werden Anwendungsbeispiele gezeigt, die den Nutzen der Quantensensorik hervorheben und deren Potenzial für den Einsatz in der Industrie.

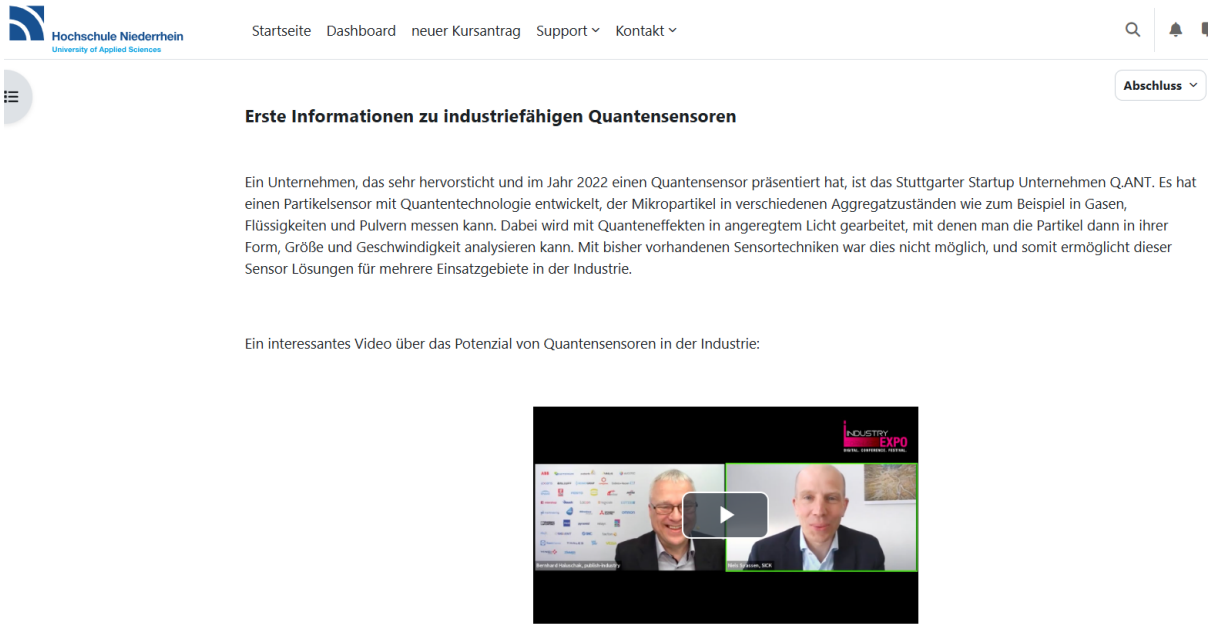


Abbildung 9 Auszug aus dem Kursteil Anwendung von Quantensensoren

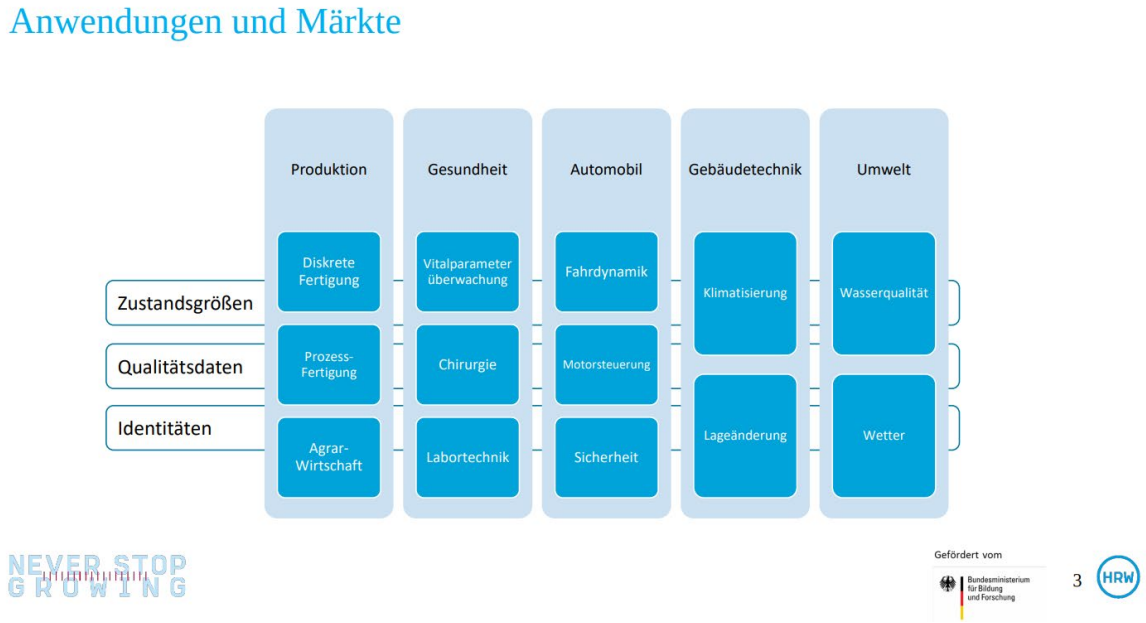


Abbildung 10 Auszug aus dem Kursteil Anwendung von Quantensensoren

Experimente

Hinter dieser Lernkachel verbergen sich eine Vielzahl von Videos, welche Experimente im Bereich der Quantentechnologie zeigen. Ebenso sind hier die eigens von der HSNR entwickelten Videos und Experimente mit VR- und AR Anwendungen zugänglich.

Abbildung 11 Auszug aus dem Kursteil Experimente. Hier ist ein Video des VR-Experiments zum Michelson-Interferometers dargestellt

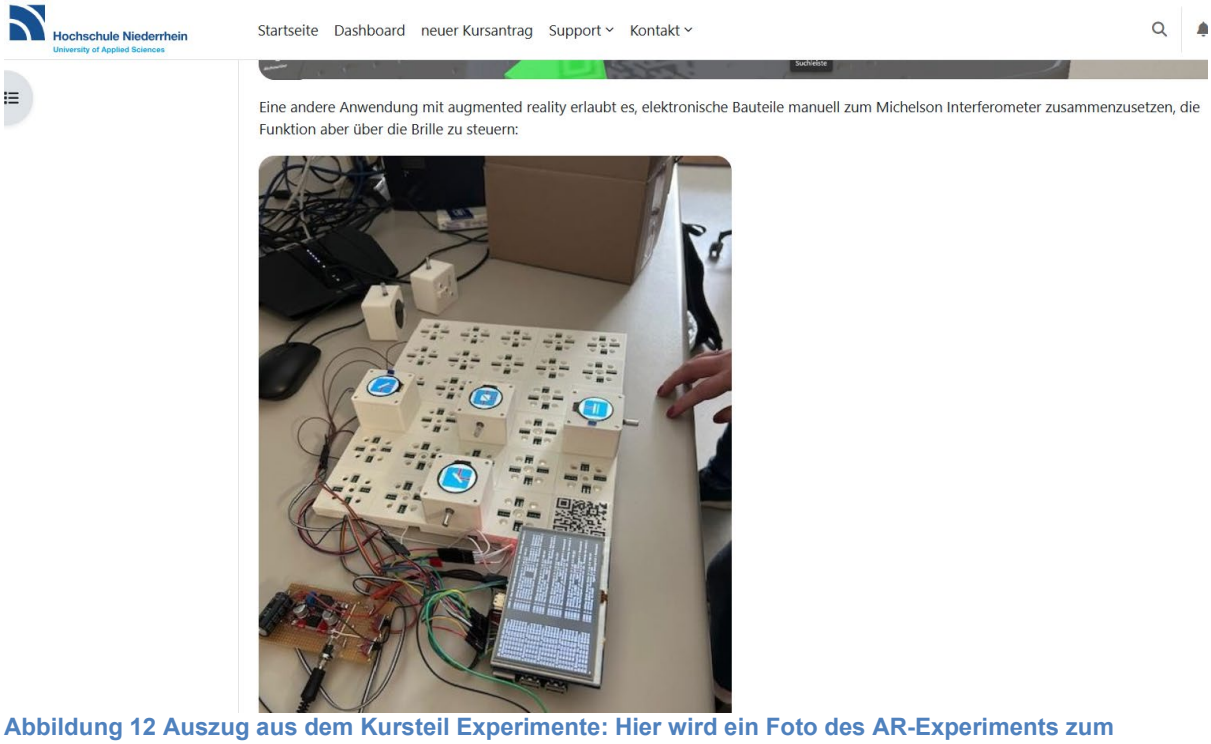


Abbildung 12 Auszug aus dem Kursteil Experimente: Hier wird ein Foto des AR-Experiments zum Michelson-Interferometers gezeigt

Glossar

Hier werden wichtige Begriffe und Terminologien erläutert.

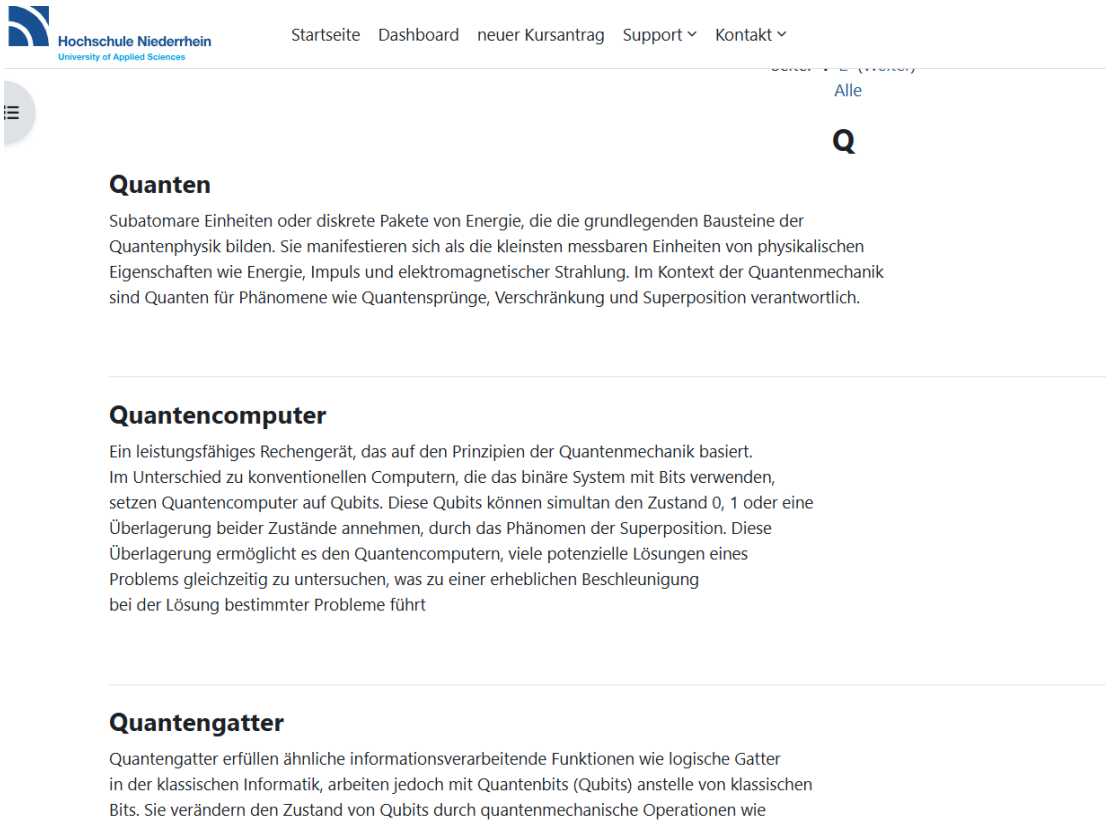


Abbildung 13 Auszug aus dem Kursteil Glossar

Forum

Das Forum beinhaltet die Kollaborationsplattform. Dort können Kursmitglieder Fragen stellen und sich über die Inhalte austauschen.

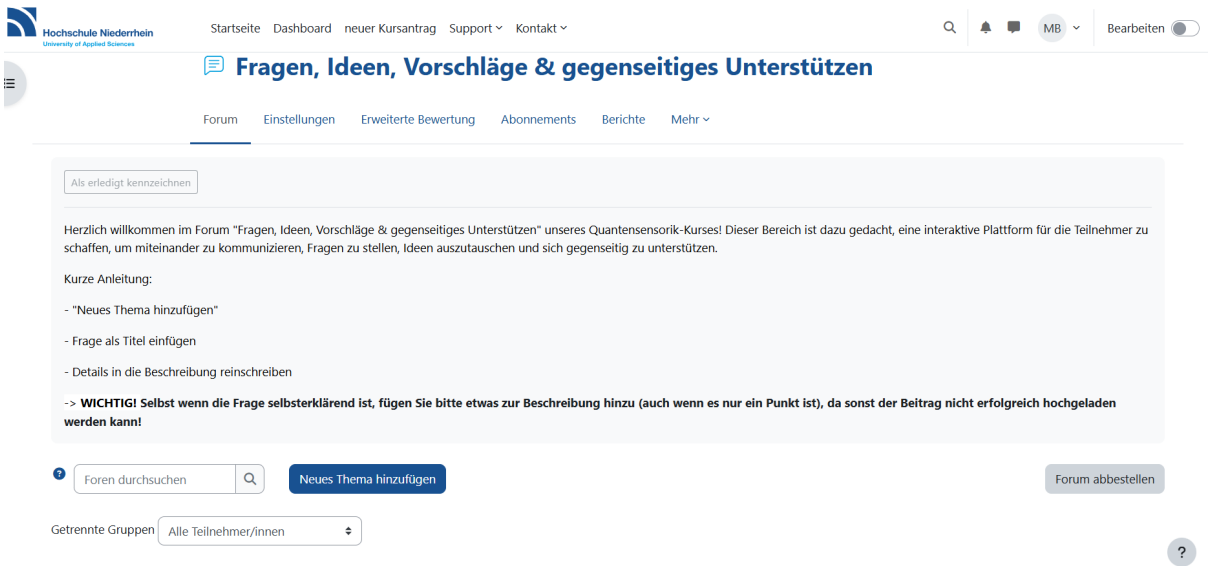


Abbildung 14 Auszug aus dem Forum des Kurses

Feedback

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt des im Rahmen der Plattform implementierten Moodle-Feedbackbogens. Dargestellt sind die ersten drei Fragen, die grundlegende Kontextinformationen zu den Teilnehmenden erfassen. Zunächst wird die Zugehörigkeit zu einer Zielgruppe (z. B. Schüler/in, Studierende oder Unternehmer/in) abgefragt, um eine differenzierte Auswertung nach Nutzergruppen zu ermöglichen. Anschließend ordnen sich die Teilnehmenden hinsichtlich ihres Vorwissens selbst ein, wodurch die Heterogenität der Lernvoraussetzungen sichtbar wird. Die dritte Frage bewertet die wahrgenommene Schwierigkeitsstufe des Kurses im Verhältnis zum individuellen Wissensstand. Diese einleitenden Fragen bilden die Basis für die Interpretation der nachfolgenden Bewertungen und liefern wichtige Anhaltspunkte für die zielgruppenspezifische Weiterentwicklung der Plattform.

Abbildung 15 Auszug des Feedbackfragebogens des Moodle Kurses

UAP3.4: Anpassung und Ergänzungen des Lehrangebotes

Lehrmaterialien wurden gesammelt, gesichtet und auf deren Eignung für die unterschiedlichen Lernlevels und Zielgruppen hin überprüft und in die Lernplattform integriert.

Es wurde mit eigens entwickelten Materialien der HSNR, aber auch der Projektpartner gearbeitet. Diese wurden einzelnen Themenbereichen zugeordnet (Vgl. Lernkacheln) und in diese eingebettet. Ebenso wurden umliegende Arbeitsgebiete mitberücksichtigt. Eine Vielzahl von Links zu extern erstellten OER wurden ebenso eingefügt.

Da die HSNR den Input der Konsortialpartner benötigte, um das Lehrangebot fertigzustellen, leistete sie insbesondere Vorarbeiten, gab Vorgaben für die Erstellung der OER bekannt und entwickelte selbst didaktische Umsetzungsmodelle. So wurde beispielsweise ein Lernpfadmodell entwickelt, um die angedachten und bearbeiteten Lehrinhalte zielführend aufzuarbeiten:

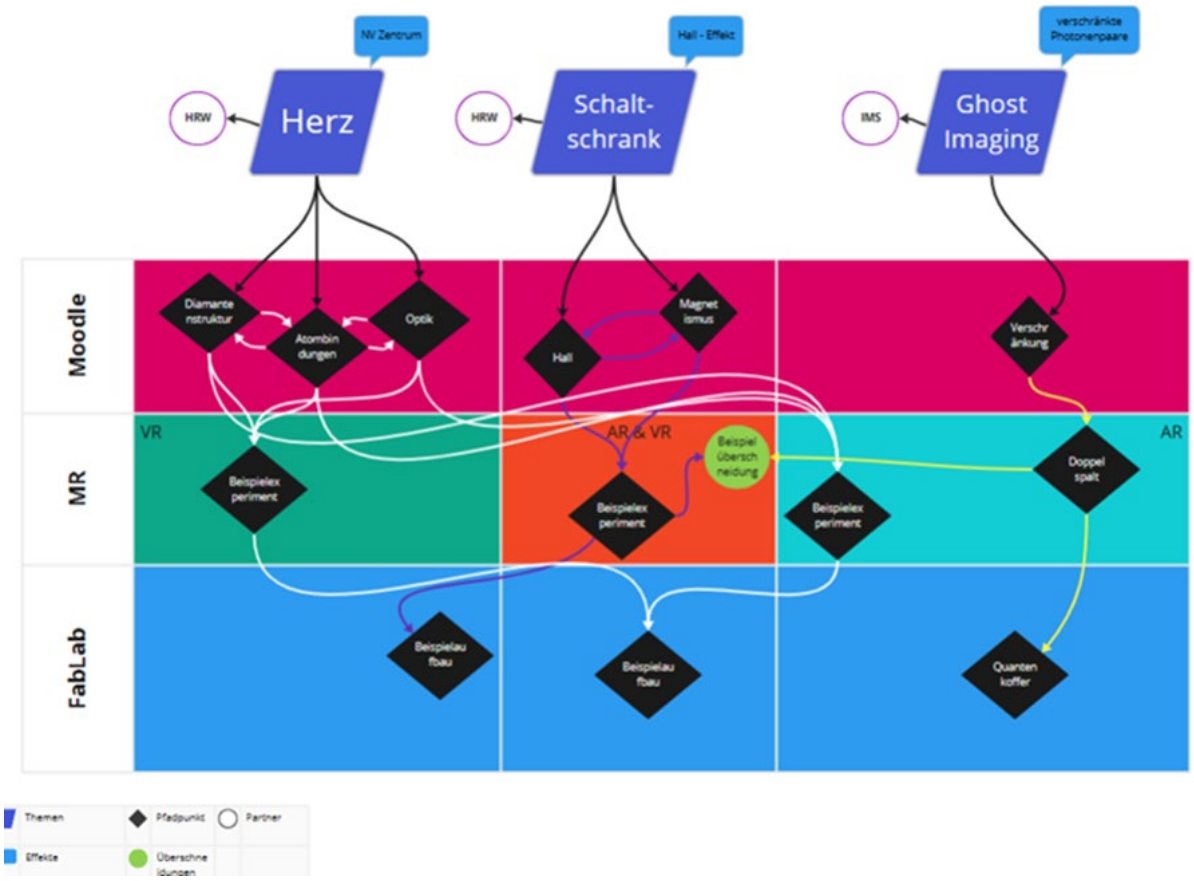


Abbildung 16 Lernpfadmodell

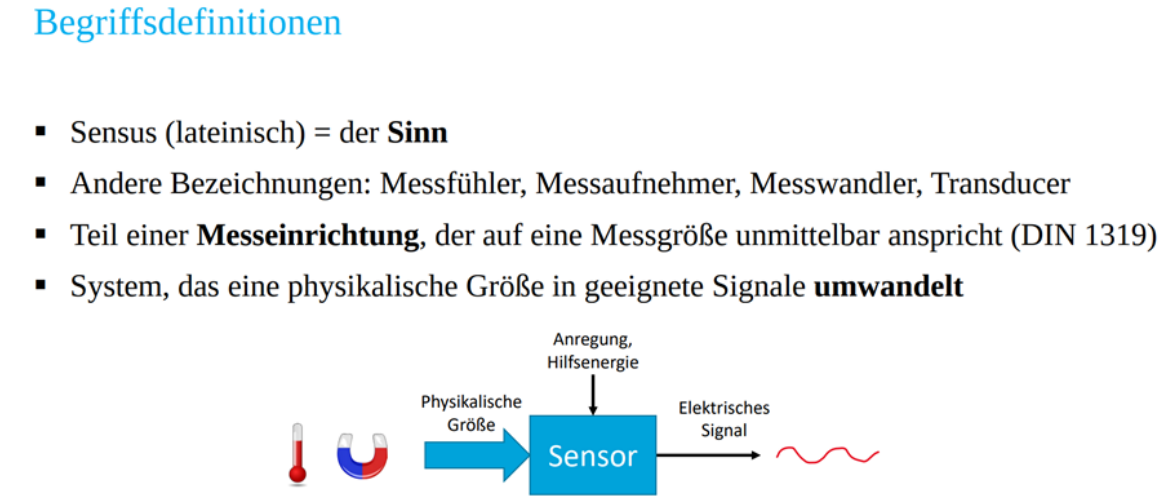


Abbildung 17 Beispiel Lehrmaterial: Einführung Sensorik

Die Abbildung 17 zeigt eine beispielhafte PowerPoint-Folie aus dem Lernmodul und führt zentrale Begriffsdefinitionen zum Thema Sensorik ein. Im Mittelpunkt stehen die Herleitung und Einordnung des Begriffs „Sensor“. Ausgehend vom lateinischen Wort *sensus* (Sinn) wird die grundlegende Bedeutung verdeutlicht. Ergänzend werden gebräuchliche Synonyme wie Messfühler, Messaufnehmer, Messwandler oder Transducer genannt, um unterschiedliche Fachterminologien aus Technik und Naturwissenschaften abzudecken.

Darüber hinaus wird die normative Definition nach DIN 1319 aufgegriffen, wonach ein Sensor Teil einer Messeinrichtung ist, der unmittelbar auf eine Messgröße anspricht. Die Folie verbindet diese formale Definition mit einer anschaulichen Systembeschreibung: Ein Sensor wandelt eine physikalische Größe – beispielsweise Temperatur oder Magnetfeld – mithilfe einer Anregung bzw. Hilfsenergie in ein elektrisches Signal um.

Die schematische Darstellung im unteren Bereich der Folie visualisiert diesen Umwandlungsprozess von der physikalischen Eingangsgröße über den Sensor hin zum elektrischen Ausgangssignal. Dadurch wird das abstrakte Konzept der Signaltransduktion didaktisch reduziert und für Lernende nachvollziehbar aufbereitet. Die Folie dient somit der begrifflichen Grundlegung und schafft ein einheitliches Verständnis als Basis für weiterführende Inhalte im Bereich der (Quanten-)Sensorik.

Nutzbarkeit von ChatGPT im QuFabLab-Kontext

Im Rahmen der Abschlussarbeit eines Bachelorstudenten wurde untersucht, ob ChatGPT Lernende beim Verstehen des Michelson-Interferometer-Experiments unterstützen kann und ob sich daraus Einsatzmöglichkeiten für eine Hololens-gestützte AR-Simulation ableiten lassen. Dazu wurden in einer Voruntersuchung ChatGPT systematisch Fragen zum Thema gestellt und die Antworten auf Stärken/Schwächen analysiert. Anschließend wurden Probanden in Interviews mit den Fragen und den von ChatGPT erzeugten Antworten konfrontiert und sollten die Qualität u. a. hinsichtlich Verständlichkeit, Struktur und Nützlichkeit reflektieren.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ChatGPT grundlegende Inhalte zum Michelson-Interferometer meist gut lesbar und strukturiert erklären kann, fortgeschrittene bzw. vertiefende Inhalte jedoch schlechter abdeckt. Als häufige Schwächen wurden zu lange, teils „schwammige“ bzw. missverständliche Antworten und das Fehlen einer sauberen Anpassung an das Vorwissen der Lernenden genannt. Kritisch sind zudem mögliche Falschaussagen („Halluzinationen“), da Lernende diese ohne Fachwissen schwer erkennen und dadurch falsche Vorstellungen verfestigen können. In der Voruntersuchung zeigte sich außerdem, dass Zusatzanweisungen (z. B. „kurz und bündig“, Rollen-/Niveauvorgaben) die Verständlichkeit verbessern können, die gewünschte Kürze aber nicht zuverlässig eingehalten wird.

Für die Hololens-Simulation wird ChatGPT vor allem als begleitendes Frage-Antwort-System für einfache Verständnisfragen zum „Was“ und „Warum“ einzelner Komponenten gesehen, da die integrierte Anleitung primär die Aufbau-Schritte beschreibt. Eine tiefe Integration als domänenspezifischer Assistenzmechanismus (z. B. für den Quantenkoffer-Aufbau) wird dagegen als wenig sinnvoll eingeschätzt, weil dafür ein aufwändiges, spezifisches Training nötig wäre und klassische Medien (Videos, bebilderte Anleitungen, Betreuung vor Ort) für Bedienfragen oft geeigneter sind.
Allerdings muss hier erwähnt werden, dass es sich bei der getesteten Version um eine frühe Version von ChatGPT gehandelt hat. Die aktuelle Version 5.2 hat signifikant an Leistungsfähigkeit zugenommen, so dass zum Ende des Projekts eine “Quantum Sensor Tutor” (siehe nächster Abschnitt) auf ChatGPT-Basis entwickelt worden ist. Leider konnte mit dieser Version keine Probanden-Test mehr durchgeführt werden. Insgesamt haben die Erfahrungen aber gezeigt, dass Chat-Bots eine sinnvolle Erweiterung der digitalen Lernplattform sind.

Quantum Sensor Tutor

Im Rahmen der digitalen Erweiterung der Bildungsplattform wurde ergänzend ein KI-gestützter Lernassistent in Form eines „Quantum Sensor Tutor“ entwickelt. Dieser Tutor basiert auf der Custom-GPT-Technologie von OpenAI innerhalb von ChatGPT und fungiert als interaktiver, adaptiver Begleitagent für Lernende im Bereich der Quantenphysik und Quantensensorik. Ziel war es, eine niedrigschwellige, jederzeit verfügbare Unterstützung zu schaffen, die sowohl zur Vorbereitung auf Experimente (z. B. mit dem Quantenkoffer) als auch zur Nachbereitung von Workshops und Lehrveranstaltungen eingesetzt werden kann.

Für die Nutzung des GPT Quantum Sensor Tutor ist ein Zugang zur ChatGPT-Plattform von OpenAI erforderlich. Da es sich um einen sogenannten Custom GPT handelt, steht der Tutor nur Nutzerinnen und Nutzern mit einem entsprechenden kostenpflichtigen Account (z. B. ChatGPT Plus, Team oder Enterprise) zur Verfügung. Ein kostenloser Basiszugang reicht für die Verwendung solcher individuell konfigurierter GPT-Agenten leider nicht aus. Vorteilhaft ist hingegen die außerordentliche Leistungsfähigkeit des zugrundeliegenden Chatbots, so dass das System in der Lage ist, auf den Nutzer individuell einzugehen und z. B. auch Gegenfragen zu stellen, um den Kenntnisstand abzufragen, um zum Nachdenken anzuregen.

Die Nutzung erfolgt über eine Weboberfläche. Eine lokale Installation von Software ist nicht erforderlich. Voraussetzung ist lediglich ein internetfähiges Endgerät (PC, Tablet oder Smartphone). Aktuell sieht die Startseite des Quantum Sensor Tutor wie folgt aus:

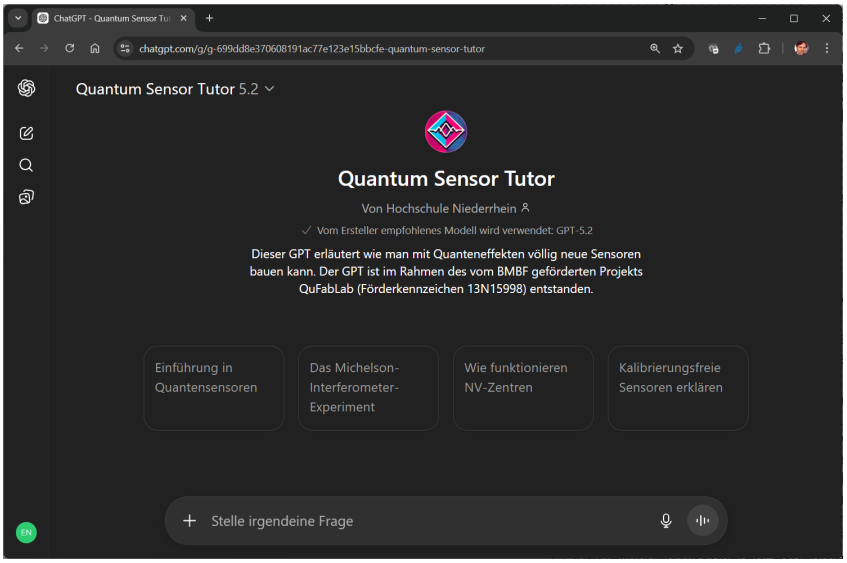


Abbildung 18 Quantum Sensor Tutor Startseite

Durch diese Plattformintegration entfällt der Bedarf an eigener Serverinfrastruktur oder Wartung seitens der Hochschule. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit an die OpenAI-Plattform gebunden. Für Bildungseinrichtungen bedeutet dies, dass entweder Einzelzugänge (z. B. Plus-Accounts) oder institutionelle Lizenzen bereitgestellt werden müssen, sofern der Tutor systematisch in Lehrveranstaltungen eingesetzt werden soll.

Der GPT Quantum Tutor ist didaktisch so konzipiert, dass er auf unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden arbeiten kann. Lernende können zwischen verschiedenen Kompetenzstufen wählen – beispielsweise „Schüler/in“, „Studierende“, „Unternehmer/in“ oder „Wissenschaftler/in“:

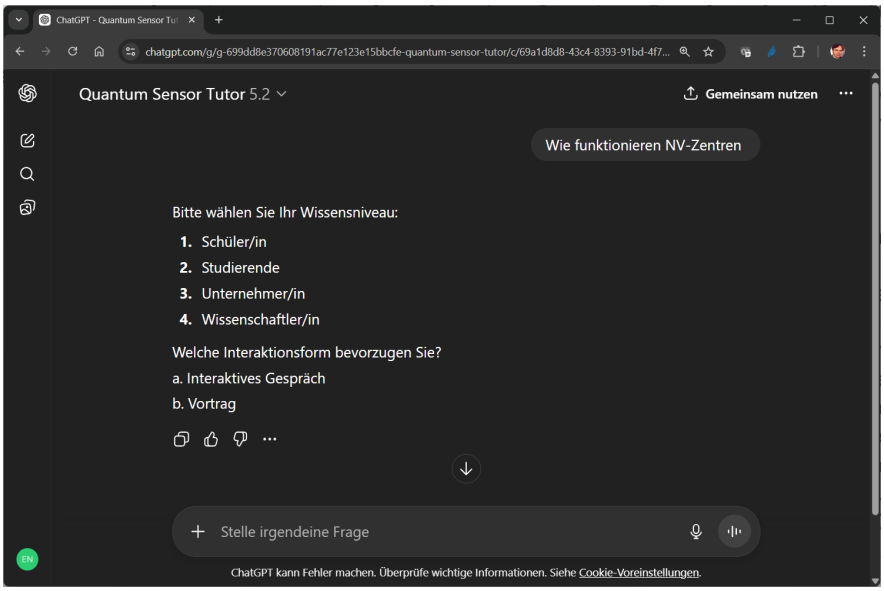


Abbildung 19 Auswahl Wissensniveau

Auf Einsteigerniveau werden grundlegende Konzepte wie Welle-Teilchen-Dualismus, Interferenz oder Photonenmodell anschaulich und mit vereinfachten Analogien erklärt. Auf fortgeschrittenem Niveau erfolgt eine formal präzisere Darstellung unter Einbezug mathematischer Zusammenhänge, experimenteller Randbedingungen und technischer Anwendungen. Auf vertiefender Ebene kann der Tutor komplexere Fragestellungen diskutieren, experimentelle Parameter analysieren oder konzeptionelle Unterschiede zwischen klassischer und quantenmechanischer Beschreibung herausarbeiten. Durch diese Differenzierung wird eine adaptive Unterstützung ermöglicht, die sich an Vorwissen und Lernzielen der Nutzenden orientiert. Dem Tutor steht als Wissensbasis Dokumente aus dem Projekt zur Verfügung, so dass er gezielt Fragen aus dem Themenumfeld beantworten kann.

Neben der freien Dialogfunktion bietet der GPT Quantum Tutor auch eine strukturierte Auswahl vordefinierter Themenfelder an, um einen einfachen und schnellen Einstieg in die Thematik zu ermöglichen:

- Einführung in Quantensensoren
- Das Michelson-Interferometer-Experiment
- Wie funktionieren NV-Zentren?
- Kalibrierungsfreie Sensoren erklären

Diese thematische Vorauswahl unterstützt insbesondere weniger erfahrene Lernende dabei, zielgerichtet in Inhalte einzusteigen und sich entlang eines didaktisch sinnvollen Lernpfades zu orientieren. Gleichzeitig bleibt die Möglichkeit erhalten, individuelle Fragen frei zu formulieren und explorativ zu vertiefen.

Der GPT Quantum Tutor versteht sich nicht als Ersatz für Präsenzlehre oder experimentelle Praxis, sondern als ergänzendes Assistenzsystem. Er dient der Vorstrukturierung von Wissen, der Klärung von Verständnisfragen, der Wiederholung zentraler Konzepte sowie der Reflexion experimenteller Beobachtungen. Durch die Kombination aus adaptivem Schwierigkeitsgrad, thematischer Strukturierung und dialogischer Interaktion stellt der Tutor eine flexible, skalierbare Ergänzung der entwickelten VR-/AR- und haptischen Lernumgebungen dar und erweitert das Gesamtökosystem um eine extrem leistungsfähige KI-basierte, individualisierbare Lernkomponente. Trotzdem müssen auch die Nachteile dieses Ansatzes gesehen werden: die Notwendigkeit eines kostenpflichtigen ChatGPT-Plus Accounts und die Cloud-basierte Datenverarbeitung. Für eine Diskussion von sensiblen Themen (z.B. Firmengeheimnissen) ist das System daher nicht geeignet. Daher wurde auch eine Version des Tutors entwickelt, die mit einem lokal ausführbaren Chat-Bot operiert und somit keine Cloud-Ressourcen benötigt.

“Lokaler” Quanten Tutor

Im Zuge der digitalen Erweiterung der Bildungsplattform wurde ergänzend ein KI-gestützter Lernassistent realisiert, der als Alternative zu externen Cloud-Angeboten konzipiert ist. Der Tutor nutzt ein lokal betriebenes Sprachmodell (aktuell Microsoft Phi-4) und unterstützt Lernende bei Themen der Quantenphysik und Quantensensorik – sowohl zur Vorbereitung

von Experimenten (z. B. mit dem Quantenkoffer) als auch zur Nachbereitung von Workshops und Lehrveranstaltungen.

Der Tutor ist als eigenes Element direkt in den projektbegleitenden Moodle-Kurs integriert und kann ohne zusätzliche Registrierung genutzt werden. Hosting und Betrieb erfolgen bei uns innerhalb der vorhandenen IT-Infrastruktur; eine Verarbeitung über externe Plattformen ist nicht erforderlich. Die Nutzung erfolgt über eine in Moodle eingebettete Weboberfläche, sodass auf Seiten der Teilnehmenden lediglich ein Browser benötigt wird.

Didaktisch bietet der Tutor wählbare Kompetenzstufen (z. B. Einstieg, Aufbau, Vertiefung) und kann projektinterne Materialien als Wissensbasis einbeziehen. Neben dem freien Dialog stehen analog zum GPT Quantum Sensor Tutor auch hier kuratierte Themenzugänge (u. a. Grundlagen der Quantenmechanik, Interferenz/Michelson, Quantensensoren, NV-Zentren) zur Verfügung. Damit ergänzt der Tutor die Präsenzlehre und die praktischen Lernumgebungen, erfordert jedoch im Gegenzug lokalen Hardware- sowie Wartungsaufwand.

Gegenüber einer ChatGPT-basierten Lösung bietet der lokal bei uns gehostete Tutor vor allem Vorteile bei Datenschutz und Kontrolle: Nutzereingaben und kursbezogene Inhalte verbleiben in unserer Infrastruktur und sind nicht an eine externe Cloud-Verarbeitung gebunden. Zudem entfällt die Abhängigkeit von individuellen, kostenpflichtigen Accounts oder Anbieter-Lizenzmodellen, was den Einsatz in Lehrveranstaltungen planbarer macht. Durch die enge Moodle-Integration kann der Tutor außerdem direkt mit den im Kurs bereitgestellten Materialien und Aufgaben verknüpft werden, ohne Medienbruch und ohne Plattformwechsel.

UAP 3.5 Veranstaltung von zielgruppenspezifischen Online-Workshops zur Einführung in Quantentechnologien

Da seitens der Projektpartner der erforderliche Input nur verzögert erzeugt werden konnte, wurden die Workshops auf das letzte Projektjahr verlegt. Dafür wurden zur Vorbereitung im Rahmen der DGBMT Tagung im Oktober 2023 das Projekt mit seiner Lehrplattform und u.a. eine AR Anwendung zur Nutzung des Quantenkoffers an einem eigenen Stand vorgestellt.

Abbildung 20 Ausstellungsstand DG BMT Kongress

Zusätzlich wurden zwei Workshops durchgeführt, in welchen das Projekt und Potenziale der Quantensensorik dargestellt sowie die Bedarfe der rund 40 Teilnehmenden an eine Wissensvermittlung abgefragt wurden.

Abbildung 21 Workshop auf DG BMT Kongress 2023

Nach Auswertung der Fragebögen ergaben sich bei gezielten Fragen zur Lernform und Lehrmaterialien folgende Ergebnisse:

Abbildung 22 Umfrageresultate, welche Lernform gewünscht ist

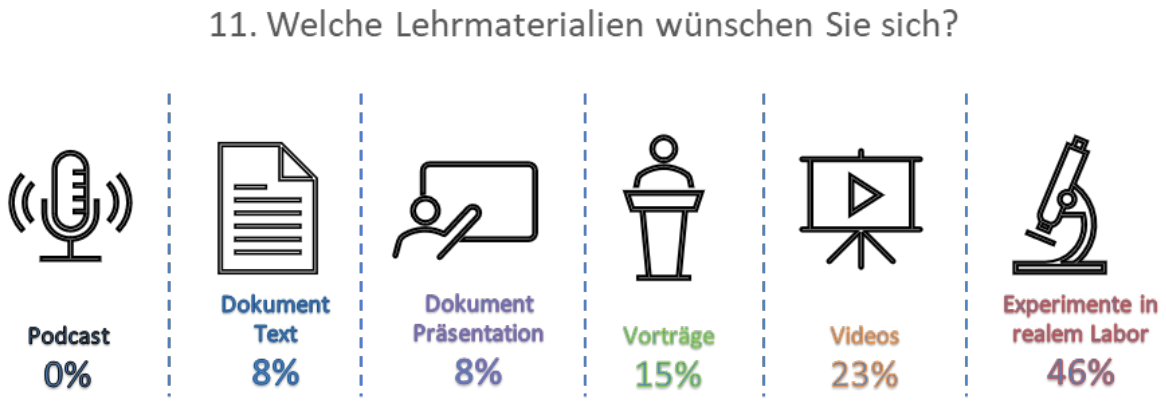


Abbildung 23 Umfrageresultate, welche Lehrmaterialien gewünscht sind

UAP3.6: Evaluation des Lehrangebots

Die Evaluation des Lernangebotes wurde im Berichtszeitraum geplant, organisiert und technisch umgesetzt. Die Integration eines Bewertungstools wurde ausgeschlossen und durch eine Feedback Funktion ersetzt.

Es wurde ein Moodle Gastzugang für den QuFabLab-Kurs eingerichtet, damit hochschulexterne Personen die Plattform nutzen können. Als Gast sind die Funktionen jedoch sehr eingeschränkt, da man nichts aktiv nutzen kann: Funktionen wie Abstimmung, Aufgabe, Feedback und Gruppenwahl sind als Gast nicht zu nutzen. Andere Aktivitäten wie das Glossar und das Forum können zwar gelesen werden, aber Gäste können keinen Beitrag verfassen. Diese Zugangsbeschränkungen konnten im Projektverlauf leider nicht aufgehoben werden, da dafür die Beschaffung einer neuen Moodle Version für die HSNR eine strategische Entscheidung des Präsidiums notwendig macht und die Systemumstellungen zeitraubend sind. Die Evaluation des Angebots wurde daher im Projektzeitraum nicht abschließend umgesetzt.

Da die entwickelte Plattform zukünftig hochschulintern in der Lehre und im Makerspace eingesetzt werden soll, werden die Personen an der HSNR diese zu einem späteren Zeitpunkt nutzen und ihr Feedback für eine Evaluation geben können.

Weitere Informationen zur Evaluation vergleiche Kapitel 1.1.4.

Abbildung 24 Flyer zur Verbreitung des Online-Lernangebotes

1.1.3 AP 4 Entwicklung offener Lernmaterialien und didaktischer Makro- und Funktionsmodelle

Dieses Arbeitspaket ist in die drei Unterarbeitspakete 4.1 bis 4.3 aufgeteilt. Im Berichtszeitraum relevant waren alle drei UAPs.

UAP4.1: Erfassung und Anpassung existierender, frei verfügbarer Lernressourcen

Lernmaterial zu Grundlagenwissen standen im Fokus der Arbeiten, um das Verständnis für die Quantentechnologie und Photonik zu verbessern und damit die Quantensensorik besser verstehen zu können. Es wurde der Moodle Kurs zum Grundlagenwissen ausgebaut, da im Projektverlauf deutlich wurde, welche Relevanz dieses Wissen hat, um die Quantenmechanik und Sensorik verständlich zu machen.

Lehrmaterialien mit experimentellem Charakter wurden dabei weiterhin besonders in den Fokus genommen, um das Lernangebot um besonders interessante und motivierende Komponenten zu ergänzen.

UAP4.2: Entwicklung neuer Lernressourcen

In diesem UAP wurden OER entwickelt, welche auf Grundlage der VR- und AR-Technologien basieren. Als OER wurden Experimente und Erklärungen zur Quantenverschränkung (Ghost Imaging) und dem Michelson Interferometer entwickelt.

Basis war die Ausrichtung der Arbeiten auf den im Projektverlauf eingesetzten Quantenkoffer von qutools (https://qutools.com/), um einige der damit durchführbaren Experimente auch auf VR und AR Basis mit haptischen Artefakten durchführen zu können. Der Quantenkoffer von qutools ist ein innovatives, didaktisch durchdachtes Lehr-Lern-Set zur praxisnahen Vermittlung von Grundlagen der Quantenphysik und Quantentechnologien. Er kombiniert experimentelle Komponenten, digitale Lernmodule und strukturierte Unterrichtsmaterialien, um komplexe Konzepte wie Superposition, Verschränkung oder Quantenmessung anschaulich und interaktiv erfahrbar zu machen. Ziel ist es, Lernenden einen niedrigschwelligen, zugleich fachlich fundierten Zugang zur zweiten Quantenrevolution zu eröffnen und Lehrkräfte bei einer modernen, kompetenzorientierten Unterrichtsgestaltung zu unterstützen.

Allerdings ist der Quantenkoffer mit erheblichen Anschaffungskosten verbunden, was seinen Einsatz häufig auf spezialisierte Einrichtungen oder geförderte Projekte beschränkt. Hinzu kommt, dass der Aufbau und die Justierung der enthaltenen Experimente ein hohes Maß an technischem Geschick, zeitlicher Vorbereitung und idealerweise praktische Erfahrung im Umgang mit optischen Komponenten erfordern. Bereits kleine Fehljustierungen können die Versuchsdurchführung beeinträchtigen und zu Frustration im Unterricht führen. Aus diesem Grund haben wir ein ergänzendes VR/AR-Experiment entwickelt, das es ermöglicht, die Versuchsaufbauten virtuell zu simulieren und Abläufe im Vorfeld einzuüben. Auf diese Weise können Lehrkräfte und Lernende zentrale Handgriffe, Aufbauprinzipien und typische Fehlerquellen risikofrei trainieren, bevor sie mit dem realen Quantenkoffer arbeiten.

Alle im Projekt entwickelten VR/AR-Komponenten nutzen dabei die Microsoft Hololens als Anzeigegerät. Dies hat sich im Nachhinein als eine ungünstige Entscheidung herausgestellt, da Microsoft inzwischen die Entwicklung der Hololens-Reihe eingestellt hat. Die Entscheidung war zum Projektstart technisch plausibel; die Marktveränderung unterstreicht aber die Notwendigkeit plattformunabhängiger Entwicklungen. So wurde als Software-Umgebung das Unity-Framework ausgewählt, welches von vielen unterschiedlichen VR/AR-Brillen unterstützt wird und somit eine gute Basis für die nachhaltige Weiterentwicklung des Systems bildet.

Als VR-OER wurde im Projekt auch das Prinzip des Ghost Imaging umgesetzt, um diesen Quanteneffekt verständlich zu machen.

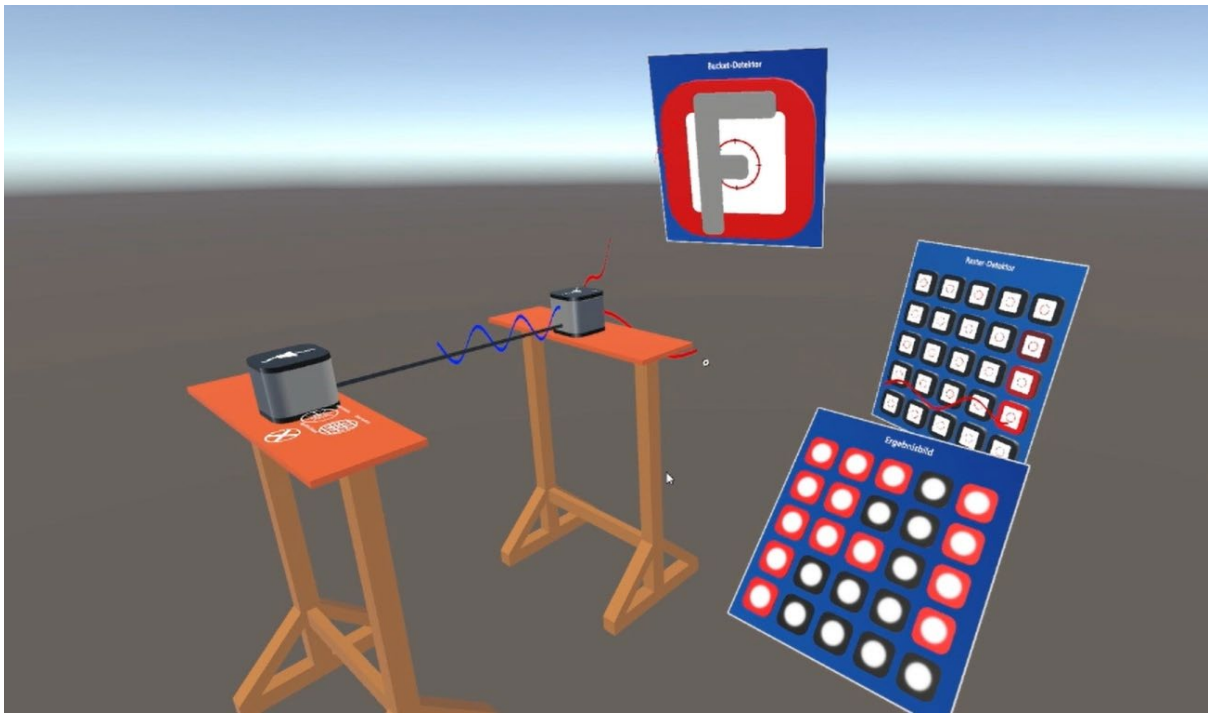


Abbildung 25 Das Ghost Imaging Experiment in VR

Entwicklung von MR-Anwendungen für den Quantenkoffer und DIY-Quantenkoffer

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 wurde die Entwicklung eines AR-Interfaces und eines VR Interfaces für den Quantenkoffer und einen DIY-Quantenkoffer als zentraler Baustein zur didaktischen Erweiterung des bestehenden Lernangebots konzipiert. Ziel war es, die Nutzung des realen Quantenkoffers durch eine virtuelle bzw. augmentierte Lernumgebung methodisch vorzubereiten, zu begleiten und zu reflektieren. Aufbauend auf den im Projekt entwickelten OER, VR-Szenarien und haptischen Artefakten wurde ein mehrstufiges Interaktionskonzept realisiert, das sowohl eine vollständig virtuelle Simulation als auch hybride Mixed-Reality-Ansätze mit physischen Spielsteinen umfasst. Neben der technischen Umsetzung – u. a. mit Unity und Microsoft HoloLens – standen insbesondere didaktische Fragestellungen im Fokus: Wie viel Haptik unterstützt den Lernprozess? Wie kann Fehlbedienung konstruktiv rückgemeldet werden? Und wie lässt sich der Transfer vom simulierten Aufbau zum realen Experiment effizient gestalten? Das AR-Interface versteht sich somit nicht nur als technisches Add-on, sondern als integraler Bestandteil eines

abgestuften, kompetenzorientierten Lernsettings zur nachhaltigen Vermittlung quantenphysikalischer Experimente.

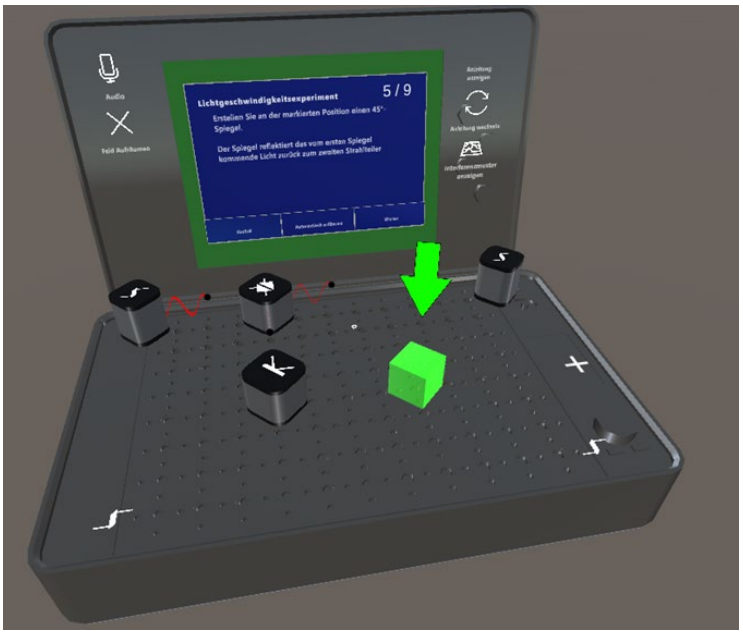


Abbildung 26 Darstellung des Michelson-Interferometers in VR. Grün markiert ist die Anleitung, wo der nächste Stein zu platzieren ist

Als erstes Anwendungsbeispiel wurde das Michelson-Interferometer umgesetzt, da es sich didaktisch besonders gut eignet, um das Prinzip der Interferenz anschaulich zu vermitteln und zugleich den Transfer zu realen Anwendungsfeldern hochpräziser Längen- und Wegmessungen herzustellen. Ziel war es, ein zentrales Experiment der Optik und Quantenphysik so aufzubereiten, dass sowohl das physikalische Funktionsprinzip als auch die logische Struktur des Aufbaus nachvollziehbar werden.

Die entwickelte VR-Anwendung orientiert sich dabei konsequent am realen Aufbau des Quantenkoffers: Die optischen Komponenten werden als digitale „Spielsteine“ modelliert, die ihren realen Pendants entsprechen (z. B. 90°-Spiegel, Strahlteiler, Detektoren). Über ein Plus-Symbol in der Benutzeroberfläche können die jeweiligen Elemente erzeugt und per Drag-and-Drop auf einem virtuellen Spielfeld platziert werden. Dadurch entsteht eine enge Analogie zwischen virtueller und realer Handlungsebene, was die spätere Übertragung auf den physischen Koffer erleichtert.

Der Aufbauprozess erfolgt schrittweise und wird durch eine textbasierte, sequenzielle Anleitung begleitet. Für jeden Schritt wird konkret vorgegeben, welcher Spielstein auszuwählen, an welcher Position zu platzieren und in welcher Orientierung auszurichten ist. Zusätzlich visualisiert das System die korrekte Zielposition auf dem Spielfeld, sodass räumliche Struktur und funktionale Abhängigkeiten des Interferometers transparent werden. Parallel dazu wird der Laserstrahl simuliert, wodurch unmittelbar sichtbar wird, wie sich Änderungen einzelner Komponenten auf den Strahlverlauf und das Interferenzmuster auswirken.

Ein zentrales didaktisches Element ist das integrierte Fehlermanagement: Bei inkorrekter Platzierung, falscher Rotation oder Auswahl eines ungeeigneten Bausteintyps wird das betreffende Element visuell hervorgehoben. Ergänzend erscheint ein Dialogfenster mit einer präzisen Rückmeldung zur Art des Fehlers (z. B. falscher Winkel, unzulässige Position, ungeeigneter optischer Typ). Dieses unmittelbare Feedback unterstützt einen explorativen Lernprozess und ermöglicht eine selbstgesteuerte Korrektur. Auf diese Weise wird nicht nur das „richtige“ Endergebnis vermittelt, sondern auch das Verständnis für die funktionalen Zusammenhänge innerhalb des Interferometeraufbaus systematisch gefördert.

Abbildung 27 Fehleranzeige, wenn ein Spielstein die falsche Rotation oder den falschen Typ hat.

Abbildung 28 Startbildschirm Michelson Interferometer

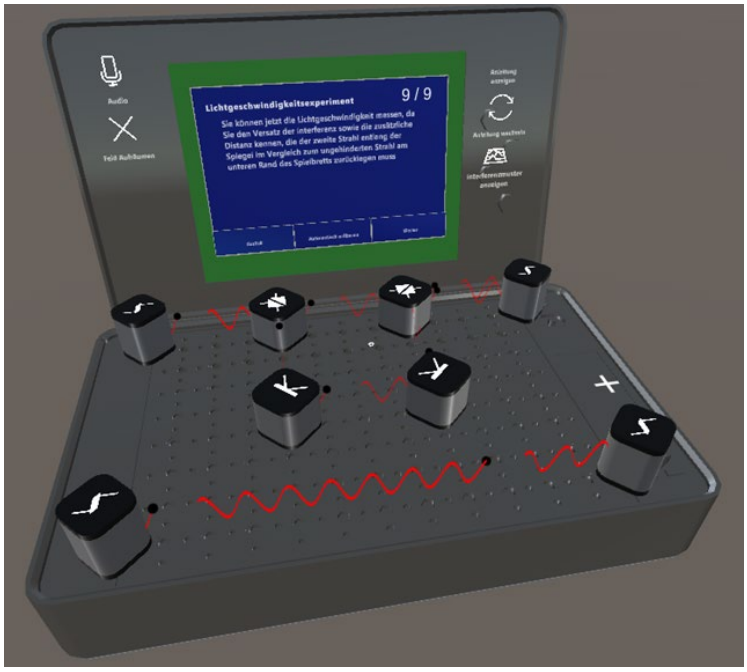


Abbildung 29 Hier ist die Durchführung des Michelson-Interferometer Experiments in reiner VR zu sehen

Der Moodle-Kurs stellt die theoretischen Grundlagen differenziert und zielgruppengerecht bereit, indem zentrale Konzepte – von optischen Grundprinzipien über Interferenzphänomene bis hin zu quantenphysikalischen Einordnungen – strukturiert, modularisiert und in unterschiedlichen Anforderungsniveaus aufbereitet werden. Aufbauend auf diesem kognitiven Fundament werden die Inhalte in interaktive VR-Experimente überführt, in denen die Lernenden die zuvor erarbeiteten Konzepte aktiv anwenden, variieren und explorativ überprüfen können. Ein anschließendes Quiz dient der formativen Lernstandserhebung und unterstützt die Reflexion der erarbeiteten Inhalte. Durch diese enge Verzahnung von Lernzielen, theoretischer Vermittlung, experimenteller Anwendung und Überprüfung wurde das Prinzip des Constructive Alignment konsequent umgesetzt: Lernziele, Lehr-Lern-Aktivitäten und Prüfungsformate sind inhaltlich und methodisch aufeinander abgestimmt, sodass ein kohärenter und nachhaltiger Kompetenzaufbau ermöglicht wird.

UAP4.3: Entwicklung haptischer Artefakte

In diesem Arbeitspaket entwickelte die HSNR systematisch unterschiedliche didaktische und technische Konzepte, um zentrale Effekte der Quantentechnologie – insbesondere mit Relevanz für die Quantensensorik – anschaulich, handlungsorientiert und zielgruppengerecht erfahrbar zu machen. Ziel war es, abstrakte physikalische Prinzipien wie Interferenz, Kohärenz oder Überlagerung nicht ausschließlich theoretisch zu vermitteln, sondern durch interaktive, hybride Lernumgebungen, d.h. VR/AR in Kombination mit haptischen Artefakten, konkret erfahrbar zu machen und in authentische Anwendungskontexte zu überführen.

Als Ersatz für die rein virtuellen Spielsteinen in der ersten MR-Version wurden jetzt haptische Steine und ein reales “Spielbrett” genutzt. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass die Interaktion mit dem Aufbau nun nicht nur optisch geschieht, sondern auch taktil erfahrbar ist. Neben visuellen und haptischen Komponenten wurde ergänzend eine Sprachschnittstelle implementiert, die Anleitungen, Rückmeldungen und Interaktionshinweise auditiv unterstützt und so unterschiedliche Lernkanäle adressiert.

Während der Entwicklungsphase standen mehrere zentrale Fragestellungen im Fokus, die sowohl technischer als auch didaktischer Natur waren:

- **Technische Herausforderungen:** Ein wesentlicher Schwerpunkt lag auf der Realisierung eines zuverlässigen Spielfeld- und Bausteintrackings. Dabei mussten Fragen der Positions- und Rotationsbestimmung, der Erkennungsstabilität unter unterschiedlichen Lichtbedingungen sowie der Synchronisation zwischen physischer Interaktion und digitaler Visualisierung gelöst werden. Insbesondere bei hybriden AR-Ansätzen war die präzise Zuordnung zwischen real platzierten Spielsteinen und deren virtueller Repräsentation entscheidend für die funktionale Korrektheit der Simulation.
- **Didaktische Fragestellungen – Grad der Digitalisierung:** Ein zentrales Thema war die Balance zwischen digitaler Unterstützung und kognitiver Eigenleistung. Es wurde untersucht, wie viel Automatisierung (z. B. automatische Korrektur, visuelle Hilfslinien, Schritt-für-Schritt-Anleitungen) lernförderlich ist und ab welchem Punkt digitale Assistenz den aktiven Denkprozess eher ersetzt als unterstützt. Ziel war es, ein didaktisch sinnvolles Maß an Unterstützung zu definieren, das Orientierung bietet, ohne exploratives Lernen zu unterbinden.
- **UI/UX und Interaktionsdesign:** Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Evaluation und Optimierung der bestehenden Interaktionsmechanismen. Dabei wurden Aspekte wie intuitive Bedienbarkeit, kognitive Belastung, Fehlertoleranz, Rückmeldemechanismen sowie die Ergonomie der eingesetzten AR-/VR-Devices analysiert. Besonderes Augenmerk galt der Frage, ob physische Interaktion (z. B. reale Dreh- und Steckmechanismen) gegenüber rein virtuellen Controls zu einer höheren Handlungssicherheit und einem besseren Systemverständnis führt.
- **Ökonomische und organisatorische Rahmenbedingungen:** Neben technischen und didaktischen Überlegungen wurde auch die wirtschaftliche Skalierbarkeit betrachtet. Analysiert wurden Materialkosten, Herstellungsverfahren (z. B. 3D-Druck, Platinenfertigung), Wartungsaufwand sowie das erforderliche technische Know-how für Aufbau und Betrieb. Ziel war es, unterschiedliche Ausbaustufen zu entwickeln – von kostengünstigen DIY-Varianten bis hin zu technisch anspruchsvolleren AR-Setups – um verschiedene Bildungseinrichtungen mit unterschiedlichen Ressourcen adressieren zu können.

Insgesamt verband dieses Arbeitspaket technische Entwicklung, mediendidaktische Konzeption und wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse zu einem integrierten Ansatz, der sowohl Lernwirksamkeit als auch praktische Umsetzbarkeit berücksichtigt.

Im Rahmen des APs wurden also haptische Artefakte („Spielsteine“) entwickelt, die sich hinsichtlich Form, Funktionalität und Interaktionslogik an den optischen Bausteinen des realen Quantenkoffers orientieren. Ziel war es, die Struktur und Systematik des

physikalischen Aufbaus in eine greifbare, modulare Form zu übertragen. In einer Mixed-Reality-(MR)-Anwendung ersetzen diese physischen Bausteine die zuvor rein virtuellen Elemente aus der VR-Umgebung und ermöglichen damit eine hybride Lernumgebung, in der reale Manipulation und digitale Visualisierung eng miteinander verzahnt sind. Die zuvor entwickelten Interaktionskonzepte – etwa Platzieren, Rotieren, Parametrieren und Fehlerrückmeldung – wurden dabei konsequent auf die haptischen Artefakte übertragen und technisch angepasst. In der MR-Anwendung werden dabei zusätzliche Informationen wie Strahlverläufe zwischen den haptischen Artefakten, Interferenzzustände oder Konfigurationshinweise eingeblendet. Dadurch werden ansonsten unsichtbare physikalische Prozesse visualisiert und in Echtzeit mit dem experimentellen Aufbau verknüpft.

Wie auch in der rein virtuellen MR-Anwendung, werden in der haptischen MR-Anwendung physikalische Effekte natürlich nicht real erzeugt, sondern softwarebasiert simuliert und visuell dargestellt. Diese Lösung erlaubt eine funktionale Nachbildung des Experimentierprozesses ohne die kostenintensive oder empfindlichen Originalkomponenten des Quantenkoffers.

Die Verwendung physischer Spielsteine ermöglicht eine explizit haptische Interaktion mit dem Experimentaufbau. Diese verfolgt zwei zentrale Zielsetzungen:

1. Didaktische Evaluation: Es soll untersucht werden, inwieweit körperlich-räumliche Interaktion das konzeptuelle Verständnis komplexer quantenphysikalischer Zusammenhänge fördert und die kognitive Verarbeitung unterstützt.
2. Vorbereitungsfunktion: Die MR-/Simulationsumgebung dient als Trainingssystem zur Vorbereitung auf die Arbeit mit dem realen Quantenkoffer.

Letzterer Aspekt ist insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Anschaffungskosten relevant. Es ist davon auszugehen, dass reale Quantenkoffer nur in begrenzter Anzahl verfügbar sind. Ein Leih- oder Rotationsmodell erscheint daher ökonomisch sinnvoll. Durch die vorbereitende Arbeit mit der simulierten bzw. MR-gestützten Variante können Lernende grundlegende Aufbauprinzipien, typische Fehlerquellen und Interaktionsabläufe bereits im Vorfeld einüben. Die knappe Nutzungszeit mit dem realen System kann dadurch effizienter, zielgerichteter und mit höherem fachlichen Ertrag gestaltet werden.

Die eigentliche Entwicklung der haptischen Komponenten lief dabei über mehrere Stufen, beginnend mit einem einfachen Holz-Modell, mit dem die Interaktion mit den Bausteinen getestet werden konnte (siehe Abbildung 13). Damit wurde auch eine erste Version der MR-Funktionalität erzeugt, so dass hier schon z.B. die Laser-Strahlen in der Ansicht des Nutzenden visualisiert wurden.

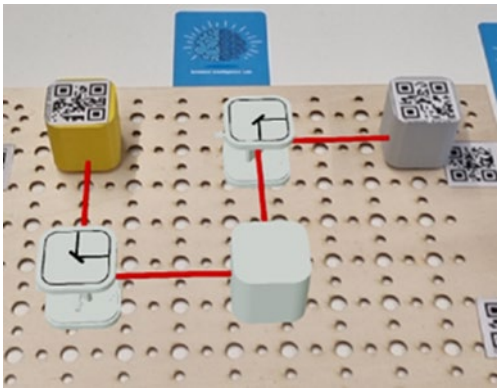


Abbildung 30 Konzept DIY Quantenkoffer “Holz-Version”

Im nächsten Schritt wurde die Funktionalität der Artefakte festgelegt und ein CAD-Entwurf erstellt.

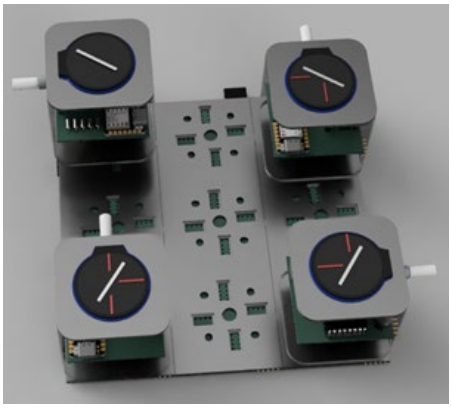


Abbildung 31 CAD-Ansicht der haptischen Artefakte auf einem “Spielbrett”

Dabei wurden unterschiedliche Varianten für die Nachbildung der Spielsteine und des Lochbretts entwickelt und umgesetzt, um preislich unterschiedliche Angebote zu entwickeln.

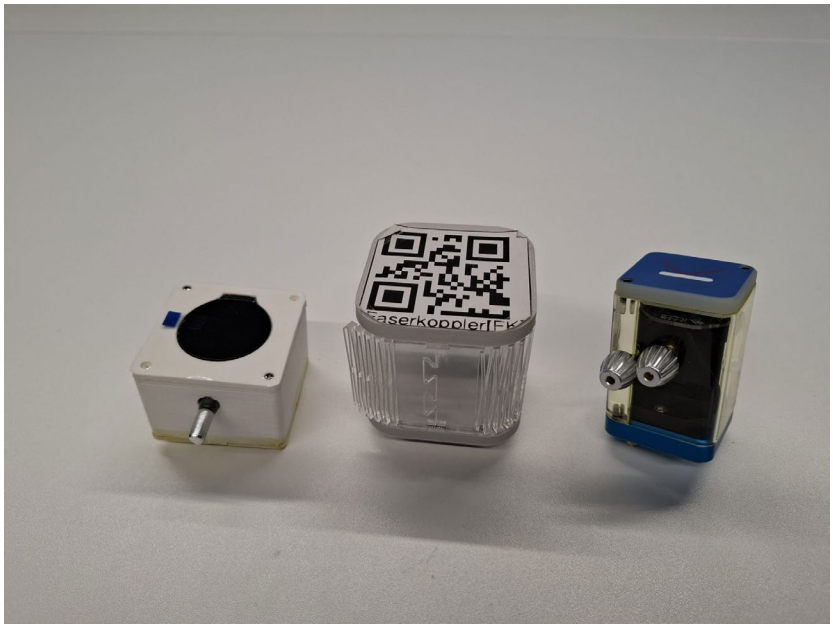


Abbildung 32 Iterationen an Bausteinen. Aktueller Baustein des AR-Aufbaus, Holzversion des AR-Aufbaus und echter Stein des Quantenkoffers

Im Unterschied zu den optischen Originalbausteinen des realen Quantenkoffers, die jeweils eine fest definierte physikalische Funktion besitzen (z. B. Spiegel, Strahlteiler, Detektor oder Polarisationskomponente), wurde bei den entwickelten haptischen Artefakten bewusst ein modularer und funktionsvariabler Ansatz gewählt. Die physischen Bausteine der MR-Anwendung sind konstruktiv identisch aufgebaut und unterscheiden sich nicht durch ihre äußere Form, sondern durch ihre softwareseitig definierte Funktionalität. Über einen seitlich integrierten Drehschalter kann die gewünschte Funktion dabei frei ausgewählt werden. Intern wird diese Auswahl an einen Mikrocontroller übermittelt, der die entsprechende Konfiguration aktiviert. Auf einem integrierten Display auf der Oberseite des Bausteins wird die aktuell gewählte Funktion unmittelbar visualisiert – beispielsweise durch ein Symbol für einen 90°-Spiegel oder einen halbdurchlässigen Strahlteiler. Dadurch ist für die Nutzenden jederzeit eindeutig erkennbar, welche Rolle der jeweilige Baustein im Aufbau übernimmt.

Dieser Ansatz bietet mehrere Vorteile: Erstens ermöglicht er es, mit einer einheitlichen Hardwareplattform sämtliche benötigten optischen Funktionen abzubilden. Die Anzahl unterschiedlicher physischer Bauteilvarianten wird dadurch reduziert, was Herstellung, Wartung und Ersatzteilmanagement vereinfacht. Zweitens erlaubt die mikrocontrollerbasierte Architektur eine Erweiterbarkeit durch Software-Updates. Neue Funktionen oder experimentelle Varianten können somit ohne mechanische Modifikation der Hardware implementiert werden. Das System ist dadurch zukunftsfähig und flexibel anpassbar.

Neben den Bausteinen selbst war die Entwicklung eines geeigneten „Spielbretts“ erforderlich, das funktional dem Aufbauprinzip des realen Quantenkoffers entspricht. Dieses Spielfeld dient nicht nur als mechanische Halterung, sondern als zentrales Interaktions- und Kommunikationsmodul.

Zur sicheren Positionierung der Bausteine wurden starke Magnete integriert, die ein präzises Einrasten ermöglichen und gleichzeitig eine definierte Orientierung vorgeben. Zusätzlich erfolgt über ein Kontaktierungssystem eine elektrische Verbindung zwischen Baustein und Spielfeld. Diese Kontaktstruktur ist codiert, sodass neben der reinen Stromversorgung auch Positions- und Rotationsinformationen übertragen werden können. Durch die Auswertung dieser codierten Kontakte kann das System erkennen:

- an welcher Position sich ein Baustein befindet und
- in welcher Ausrichtung (Rotation) der Baustein platziert wurde.

Diese Informationen werden an den Host-Computer des Spielfelds übermittelt und dort in Echtzeit verarbeitet. Die ausgewählte Funktion des Bausteins selbst (Spiegel, Strahlteiler, etc.) wird hingegen drahtlos an den Host-Computer übermittelt. Dadurch ist es möglich, den Aufbau logisch zu überprüfen, Konfigurationsfehler zu identifizieren und gezielte Rückmeldungen zu generieren. Darüber hinaus dient diese Positions- und Zustandsinformation als Grundlage für die Visualisierung des simulierten Strahlverlaufs oder weiterer experimenteller Effekte in der MR-Umgebung.

Das Zusammenspiel aus modularen, funktionsvariablen Bausteinen und einem intelligenten, kommunikationsfähigen Spielfeld schafft somit eine technisch integrierte Plattform, die sowohl didaktische Flexibilität als auch systematische Rückmeldelogik ermöglicht.

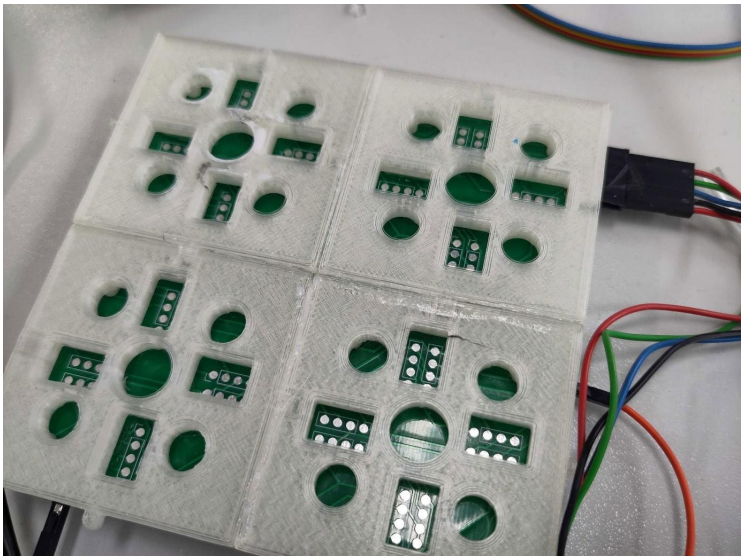


Abbildung 33 Ausschnitt aus dem Spielbrett (zu sehen sind vier Felder mit jeweils fünf Löchern die später die Magnete aufnehmen werden sowie den Kontaktfelder zur Erfassung der Position und Ausrichtung der einzusetzenden Spielsteine)

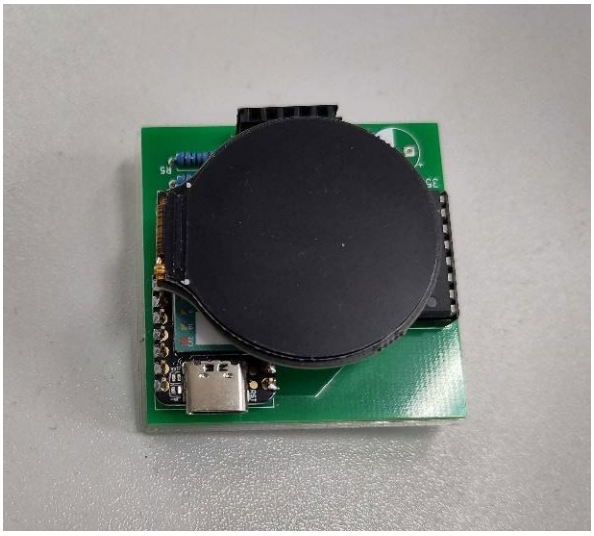


Abbildung 34 Das Displayfeld eines Spielsteins in der Draufsicht

Die unterschiedlichen Varianten der entwickelten Bausteine und Interaktionskonzepte ermöglichen eine systematische, abgestufte Untersuchung des Einflusses haptischer Interaktion auf den Lernerfolg in VR-/AR-gestützten Experimentierumgebungen. Ziel war es, nicht nur eine funktionierende Anwendung bereitzustellen, sondern experimentell zu analysieren, in welchem Maße physische Manipulation gegenüber rein virtueller Interaktion zu einem vertieften konzeptuellen Verständnis beiträgt.

1. **Vollständig virtuelle Ausbaustufe (reine VR/MR-Interaktion)**
   In der ersten Ausbaustufe werden sämtliche Interaktionen – das Platzieren, Rotieren und Konfigurieren der Bausteine – vollständig virtuell umgesetzt. Die Nutzenden greifen auf digitale Spielsteine zu, die mittels Handtracking oder Gestensteuerung im Raum manipuliert werden. Diese Variante ist stark an die Interaktionsparadigmen moderner VR-/AR-Frameworks angepasst und nutzt insbesondere die Handerkennung des eingesetzten AR-Devices (Microsoft HoloLens).

Der Fokus liegt hier auf einer intuitiven, gestenbasierten Bedienlogik mit unmittelbarem visuellem Feedback. Die Interaktionssicherheit hängt maßgeblich von der Präzision der Hand- und Positionsverfolgung ab. Diese Variante erlaubt maximale Flexibilität, da Bausteine beliebig erzeugt, verschoben und parametriert werden können, ohne physische Restriktionen. Gleichzeitig dient sie als Referenzszenario zur Bewertung rein digitaler Interaktion ohne haptische Rückmeldung.

Sowohl die virtuelle als auch die AR-Variante wurden mit der Entwicklungsumgebung Unity realisiert und auf der Microsoft HoloLens implementiert und getestet. Unity ermöglicht dabei die Integration von 3D-Modellen, Interaktionslogik, Zustandsprüfung und Echtzeit-Visualisierung des Strahlverlaufs in einer konsistenten Entwicklungsumgebung.

2. **Hybride Ausbaustufe (physische Platzierung, virtuelle Parametrierung)**
   In der zweiten Ausbaustufe wird die Platzierung der Bausteine aus der virtuellen in die physische Welt verlagert. Die Spielsteine werden real auf einem Spielfeld positioniert, wodurch eine echte räumliche Interaktion stattfindet. Die Parametrierung – beispielsweise die Auswahl der Funktion oder Feinjustierung – erfolgt jedoch weiterhin über virtuelle Bedienelemente innerhalb der AR-Umgebung.

   Diese Variante kombiniert reale motorische Handlung mit digitaler Steuerung. Ziel ist es, die Vorteile beider Welten zu verbinden: physische Stabilität und räumliche Orientierung einerseits, flexible visuelle Rückmeldungen und digitale Kontrollmechanismen andererseits. Gleichzeitig reduziert diese Zwischenstufe die Abhängigkeit von präziser Handerkennung für das Platzieren der Bausteine, da die physische Positionierung mechanisch fixiert wird.

3. **Vollständig physische Interaktion mit AR-Visualisierung**
   Die dritte und technisch anspruchsvollste Ausbaustufe erlaubt eine nahezu vollständig physische Interaktion. Sowohl die Platzierung als auch sämtliche Einstellungen erfolgen direkt am realen Baustein. Die Spielsteine werden auf einem physischen Spielfeld positioniert, über mechanische Bedienelemente (z. B. Hebel oder Drehknöpfe) auf den gewünschten Funktionstyp eingestellt und physisch in die korrekte Rotation gebracht.

   Die Rolle des AR-Devices beschränkt sich in dieser Variante auf die Visualisierung nicht sichtbarer Prozesse und die didaktische Anleitung. Insbesondere werden der simulierte Laserstrahl, optische Wege, Interferenzzustände sowie virtuelle Komponenten wie Laserquellen und -senken („Periskope“) eingeblendet. Dadurch entsteht eine klare funktionale Trennung: Die Handlungsebene ist real, die physikalische Visualisierung digital ergänzt.

   Ziel dieser Variante war, die Interaktion den Nutzenden mit dem System deutlich zu vereinfachen, weil Probleme und Eigenheiten des AR-Devices, wie sie bei der Bedienung der Varianten 1 und 2 verstärkt auftreten, hier weitestgehend wegfallen. So hat z.B. die AR-Brille Microsoft-Hololens ein leistungsfähiges Hand-Tracking, das es erlaubt, mit den Händen virtuelle Objekte zu “greifen” oder zu “manipulieren”.

Leider kommt es dabei immer wieder bei verschiedenen Nutzern zu Problemen, so dass die Nutzendenerfahrungen hier oft nicht perfekt sind. Um die Vorteile der haptischen Interaktion zu überprüfen, wurden 2025 und 2026 Workshops durchgeführt.

Diese dreistufige Architektur erlaubt es, graduell zu untersuchen, wie sich zunehmende physische Interaktion auf Bedienbarkeit, kognitive Belastung, Fehlerrate und Wissenszuwachs auswirkt. Gleichzeitig schafft sie eine flexible Plattform, um unterschiedliche technische Voraussetzungen und didaktische Szenarien abzubilden – von rein digitalem Training bis hin zu nahezu realitätsnaher experimenteller Simulation mit minimaler digitaler Eingriffstiefe.

Abbildung 35 zeigt beispielhaft die Ansicht eines Nutzers durch AR-Brille auf das Spielfeld. Zu sehen sind dabei die haptischen Artefakte (Bausteine) sowie die visualisierten Strahlengänge zwischen zwei der Bausteine. Links neben dem Spielfeld ist weiterhin der Hostcomputer des Experiments mit einem darauf installierten Display zu sehen. Am oberen Rand der Ansicht ist ein von der AR-Brille eingeblendeter Hilfe-Text zu sehen. Es ist gut erkennbar, wie nahtlos die Projektion der AR-Brille mit dem realen Spielfeld und den Bausteinen verschmilzt.

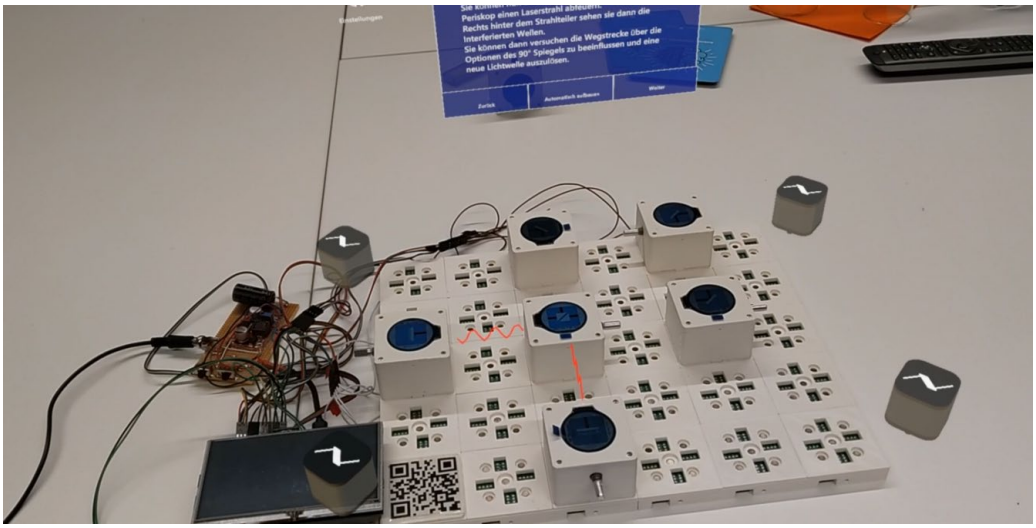


Abbildung 35 Die AR-Anwendung, während der Laserstrahl durch das Interferometer läuft

Innovationsbeitrag und Einordnung in den Stand von Technik und Forschung

Das im Projekt entwickelte System geht über eine reine Digitalisierung bestehender Experimente hinaus und stellt einen eigenständigen technologischen und mediendidaktischen Innovationsbeitrag dar. Während bestehende VR-/AR-Lernumgebungen häufig entweder vollständig virtuell operieren oder reale Experimente lediglich visualisierend ergänzen, wurde im Rahmen dieses Projekts ein integriertes Hardware-Software-Co-Design realisiert, das physische Artefakte, digitale Simulation und assistive Rückmeldung systematisch miteinander verbindet.

Ein zentrales Innovationsmerkmal liegt in der modularen, funktionsvariablen Architektur der haptischen Bausteine. Im Gegensatz zu konventionellen Experimentiersystemen mit fest

definierten Einzelkomponenten ermöglicht die softwarekonfigurierbare Hardwareplattform eine flexible Abbildung unterschiedlicher optischer Funktionen auf identischer physischer Basis. Dadurch entsteht ein skalierbares und updatefähiges Experimentiersystem, das sowohl didaktisch als auch technologisch erweiterbar ist. Diese Entkopplung von physischer Form und funktionaler Logik stellt einen neuartigen Ansatz im Bereich experimenteller Lehrsysteme dar.
Darüber hinaus wurde mit der dreistufigen Interaktionsarchitektur (vollständig virtuell – hybrid – vollständig physisch mit AR-Overlay) ein systematisches Untersuchungsmodell geschaffen, das es erlaubt, den Einfluss haptischer Interaktion auf Lernprozesse differenziert zu analysieren. Damit wird nicht nur ein technisches Artefakt bereitgestellt, sondern eine Forschungsplattform für mediendidaktische Fragestellungen entwickelt. Insbesondere die graduelle Variation des Haptikgrades ermöglicht empirische Untersuchungen zur kognitiven Belastung, zum konzeptuellen Verständnis und zur Handlungssicherheit in immersiven Lernumgebungen.
Ein weiterer innovativer Aspekt besteht in der intelligenten Rückmeldelogik des Systems. Durch die codierte Positions- und Rotationsbestimmung der Bausteine in Kombination mit softwarebasierter Zustandsanalyse kann der experimentelle Aufbau in Echtzeit validiert und didaktisch differenziert rückgemeldet werden. Dies transformiert das klassische Experimentiersetting in ein adaptives Assistenzsystem, das nicht nur Ergebnisse visualisiert, sondern Lernprozesse aktiv begleitet.
Insgesamt positioniert sich das entwickelte System an der Schnittstelle von Quantentechnologie, Mensch-Technik-Interaktion und digitaler (Hochschul-)Didaktik. Es leistet damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung hybrider Lernarchitekturen für komplexe naturwissenschaftlich-technische Inhalte. Der Innovationsgehalt liegt nicht allein in der Nutzung von VR/AR-Technologie, sondern in der integrativen Verbindung aus modularer Hardware, immersiver Visualisierung und didaktisch fundierter Interaktionsgestaltung.
Ein weiterer wesentlicher Mehrwert des Projekts liegt in der Open-Source-Strategie. Sämtliche im Projekt entwickelten Designfiles – einschließlich CAD-Daten der haptischen Artefakte, Platinenlayouts, Gehäusekonstruktionen sowie der zugehörigen Softwarekomponenten – werden offen zugänglich veröffentlicht. Damit wird nicht nur Transparenz geschaffen, sondern eine nachhaltige Nachnutzbarkeit und Weiterentwicklung durch Dritte aktiv ermöglicht.
Diese Offenlegung hat mehrere strategische Implikationen: Erstens wird die Reproduzierbarkeit des Systems sichergestellt. Bildungseinrichtungen, Schülerlabore, Hochschulen oder Makerspaces können die Hardware eigenständig nachbauen und an ihre spezifischen Bedarfe anpassen. Dadurch entsteht ein skalierbares und niedrigschwellig zugängliches Experimentiersystem, das nicht an proprietäre Anbieter oder geschlossene Plattformen gebunden ist.
Zweitens fördert die Open-Source-Veröffentlichung kollaborative Weiterentwicklung. Die modulare Architektur der Bausteine sowie die softwaredefinierte Funktionslogik erlauben es externen Entwicklerinnen und Entwicklern, neue Funktionen, experimentelle Szenarien oder Erweiterungsmodule beizusteuern. Das Projekt schafft damit nicht nur ein abgeschlossenes Produkt, sondern eine offene Entwicklungsplattform.
Drittens trägt dieser Ansatz zur langfristigen Nachhaltigkeit bei. Insbesondere vor dem Hintergrund technologischer Marktveränderungen (z. B. Einstellung bestimmter AR-Hardware) stellt die Offenheit der Systemarchitektur sicher, dass das Konzept hardwareunabhängig weitergeführt und auf neue Plattformen portiert werden kann. Die

Offenlegung der Design-Files und Software reduziert Abhängigkeiten von einzelnen Herstellern und erhöht die technologische Resilienz des Gesamtsystems. Schließlich unterstützt die Open-Source-Strategie auch die wissenschaftliche Verwertbarkeit. Forschende erhalten Zugriff auf die vollständige Systemarchitektur und können darauf aufbauend eigene empirische Untersuchungen durchführen, Systemvarianten vergleichen oder das Interaktionsdesign weiterentwickeln. Damit entsteht eine offene Forschungsinfrastruktur für hybride, haptisch-angereicherte VR-/AR-Lernumgebungen. Insgesamt verstärkt die offene Bereitstellung aller Design- und Entwicklungsdaten den Innovationscharakter des Projekts erheblich: Aus einer projektgebundenen Lösung wird eine nachhaltige, erweiterbare und wissenschaftlich anschlussfähige Plattform. Die Designfiles sind auf Github veröffentlicht worden[1].

1.1.4 Workshops zur Evaluation der AR- und VR-Anwendung

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Workshops zum Michelson-Interferometer durchgeführt. Diese fanden am Max-Planck-Gymnasium in Düsseldorf am 22.01.2025 (zwei Workshops), an der Robert-Schuman-Europaschule in Willich am 26.06.2025 (zwei Workshops) sowie an der Hochschule Niederrhein (HSNR) am 07.07.2026 und am 20.01.2026 (jeweils ein Workshop) statt.

An den Schulen nahmen Schülerinnen und Schüler der 11. Klasse aus Physikleistungskursen und Physikgrundkursen teil. An der HSNR richteten sich die Workshops am 07.07.2026 an Studierende des zweiten Semesters Informatik und am 20.01.2026 an Studierende des fünften Semesters im Studiengang Informatik und Elektrotechnik.

Ziel der Workshops war es, das Michelson-Interferometer mithilfe unterschiedlicher didaktischer Ansätze zu vermitteln und auszuwerten, ob haptische Artefakte in Kombination mit AR Anwendungen das Lernen erleichtern können - im Vergleich zur klassischen Lehrmethode. Die entwickelte VR-Anwendung wurde ebenso mit in den Vergleich einbezogen.

[1] https://github.com/AmILabor/QuFabLab.git

Abbildung 36 Schulklasse beim Workshop

Konzept der Workshops

Zu Beginn jedes Workshops wurde ein einheitlicher erster Teil für alle Teilnehmenden durchgeführt, bestehend aus einer Begrüßung, der Gruppenzuweisung sowie einem gemeinsamen Theorieteil zum Experiment. Direkt im Anschluss daran wurde der erste Teil eines standardisierten Fragebogens eingesetzt, um das Vorwissen der Teilnehmenden zu erfassen. Anschließend wurden die Teilnehmenden in drei Gruppen eingeteilt: eine klassische Gruppe, eine AR-Gruppe und eine VR-Gruppe.

Im zweiten Teil des Workshops unterschieden sich die Lernsettings je nach Gruppe. Die VR-Gruppe führte das Experiment mithilfe eines virtuellen VR-Aufbaus durch, die AR-Gruppe arbeitete mit einem Augmented-Reality-Aufbau, während die klassische Gruppe das Experiment theoretisch behandelte beziehungsweise teilweise mit dem realen Versuchsaufbau der Hochschule Ruhr West arbeitete.

Abbildung 37 Schüler:in bei der Durchführung der Experimente mit reiner VR (links) und AR (rechts)

Nach Abschluss des experimentellen Teils bearbeiteten die Teilnehmenden den zweiten Teil des Fragebogens, der sowohl der Erfassung des Wissensstands nach dem Workshop als auch der Evaluation der jeweiligen Lernumgebung diente.

Abbildung 38 Durchführung des klassischen Michelson-Interferometers Experiments der mit den von der HRW entwickelten Versuchsaufbau

Insgesamt nahmen 88 Probandinnen und Probanden an der Erhebung teil. 72 Fragebögen wurden bis zur letzten Seite vollständig ausgefüllt. Diese vollständigen Datensätze verteilen sich auf die Gruppen wie folgt: klassisch (n = 27), VR (n = 23) und AR (n = 22). Unvollständige Fragebögen wurden grundsätzlich nicht in die Auswertung aufgenommen. Davon ausgenommen ist die Auswertung des Wissenszuwachses: Hier wurden fehlende Antworten als „kein Wissen“ interpretiert und entsprechend berücksichtigt.

Für die Auswertung der Workshops wurde ein Fragebogen mit der Online-Plattform SoSciSurvey erstellt und durchgeführt. Ziel der Befragung war es, sowohl den Wissenszuwachs der Teilnehmenden im Bereich der Quantenmechanik und speziell des Michelson-Interferometers zu erfassen als auch die Nutzbarkeit und den wahrgenommenen Mehrwert der eingesetzten AR- und VR-Anwendungen zu untersuchen. Der Fragebogen war in mehrere thematische Abschnitte gegliedert und wurde in zwei Teilen während des Workshops eingesetzt. Der erste Teil diente der Erhebung des Vorwissens und wurde nach dem gemeinsamen Theorieteil, jedoch vor der Durchführung der Experimente, ausgefüllt. Der zweite Teil wurde nach Abschluss des experimentellen Teils bearbeitet und erfasste sowohl den Wissensstand nach dem Workshop als auch Einschätzungen zur jeweiligen Lernumgebung (klassisch, AR oder VR).

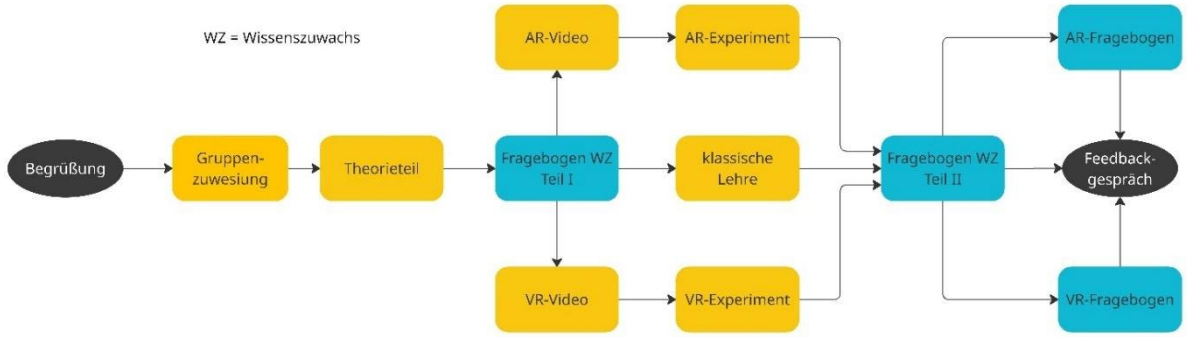


Abbildung 39 Ablaufschema des Workshops

Erfassung und Auswertung des Wissenszuwachses

Die Abfrage des fachlichen Wissens erfolgte in beiden Fragebogenteilen in Freitextform. Inhaltlich gliederten sich die Wissensfragen in zwei Bereiche:

1. Allgemeine Fragen zur Quantenmechanik
2. Spezifische Fragen zur Interferenz und zum Michelson-Interferometer.

Die offenen Antworten ermöglichten es, nicht nur reine Faktenkenntnisse, sondern auch das konzeptuelle Verständnis der Teilnehmenden zu erfassen. Die Auswertung dieser Freitextantworten wurde von Dagmar Schuhmacher (Physikerin), die auch den Theorieteil der Workshops leitete, vorgenommen. Durch diese enge inhaltliche Anbindung zwischen Lehre und Auswertung sollte eine fachlich konsistente und didaktisch begründete Bewertung sichergestellt werden.

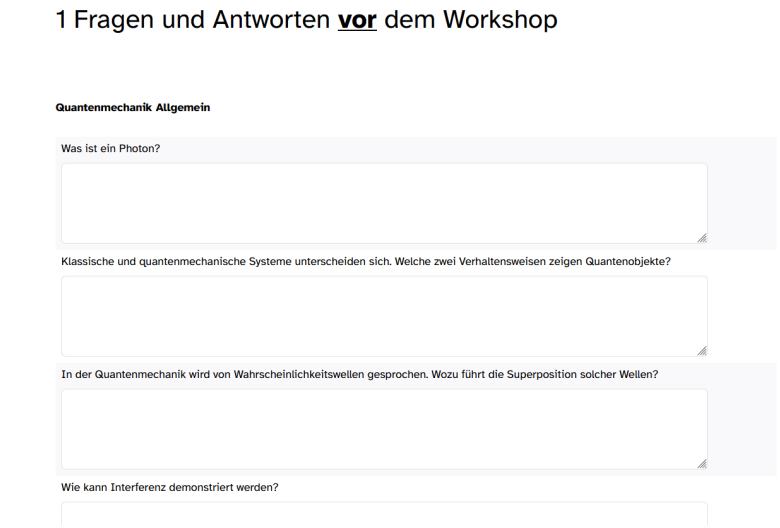


Abbildung 40 Auszug aus dem Wissenszuwachsteil des Fragebogens

Für jede einzelne Wissensfrage wurden die Antworten anhand eines Punkteschemas von 0 bis 4 bewertet. Dabei bedeutete:

- 0 Punkte: keine Antwort, nicht beantwortet oder fachlich nicht verwertbar
- 4 Punkte: vollständig korrekte und inhaltlich vollständige Antwort

Auf dieser Grundlage wurde für jede Versuchsperson und für jede Frage die Differenz zwischen dem Nachher- und dem Vorher-Wert gebildet (Nachher minus Vorher). Daraus ergab sich ein individueller Wissenszuwachs-Score, der Werte zwischen –4 und +4 annehmen konnte. Positive Werte kennzeichnen dabei einen Wissenszuwachs, negative Werte einen Rückgang oder Fehlkonzepte, und der Wert 0 zeigt keine Veränderung an. Der Wissenszuwachs wurde getrennt ausgewertet für:

- die allgemeinen Fragen zur Quantenmechanik
- die spezifischen Fragen zum Michelson-Interferometer

Abbildung 41 Gruppenauswahl des Fragebogens

Gruppenzuordnung und Vergleichbarkeit

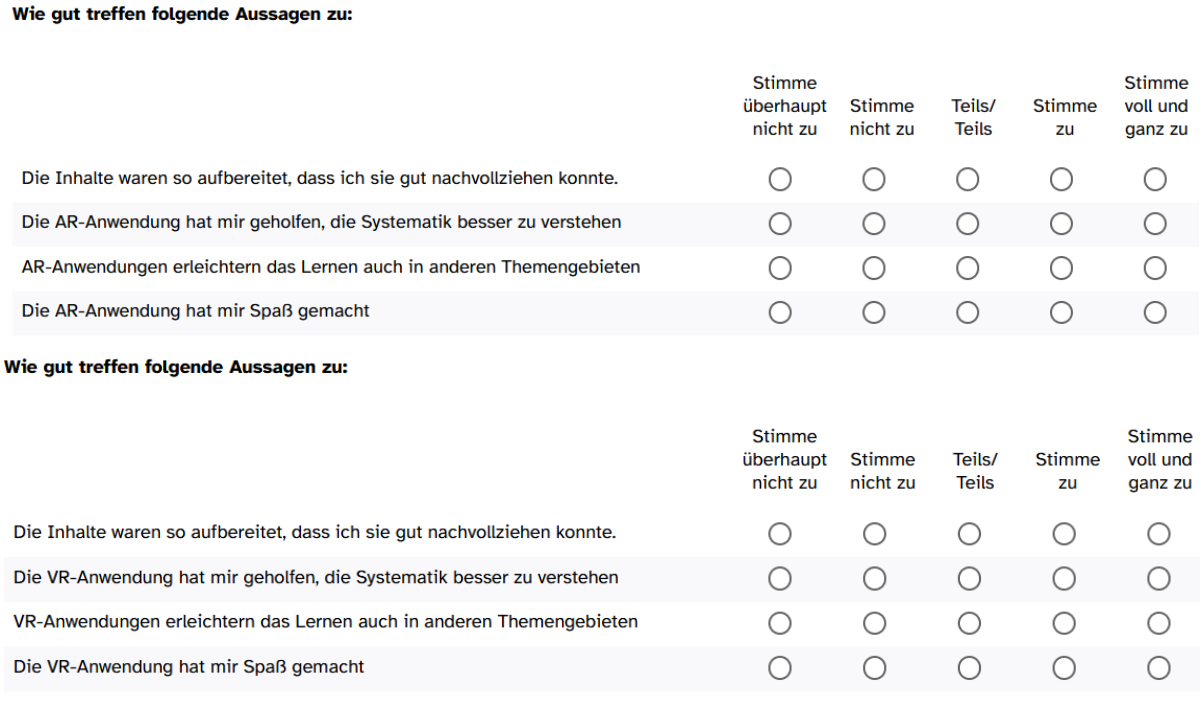
Bereits zu Beginn des Fragebogens gaben die Teilnehmenden an, welcher Versuchsgruppe sie zugeordnet waren (klassisch, AR oder VR). Diese Information diente in der späteren Auswertung dazu, die berechneten Wissenszuwächse gruppenspezifisch zu betrachten und miteinander vergleichen zu können. Die Gruppenzuordnung erfolgte anonymisiert und ausschließlich über den Fragebogen, sodass keine personenbezogenen Daten außerhalb der Erhebung gespeichert wurden. Zusätzlich wurden durch SoSciSurvey automatisch Fragebogen-interne Metadaten erfasst, wie etwa Bearbeitungsdauer, Abschlussstatus oder Seitenaufrufe. Diese Daten wurden ausschließlich zur Qualitätssicherung (z. B. Vollständigkeit der Datensätze) herangezogen und nicht inhaltlich interpretiert.

Erhebung zur Nutzung von AR- und VR-Anwendungen

Neben der Wissensabfrage enthielt der Fragebogen separate Abschnitte zur Evaluation der AR- bzw. VR-Anwendung, die jeweils nur von den entsprechenden Gruppen ausgefüllt wurden. Diese Teile bestanden aus einer Kombination aus:

- offenen Fragen, z. B. zu technischen Problemen oder subjektiven Eindrücken, und
- skalierenden Likert-Items, mit denen Aspekte wie Verständlichkeit, wahrgenommener Lernnutzen, Motivation und Spaßfaktor erfasst wurden (siehe Abb. 20).
- ein Textfeld zum Eintragen von Feedback

Durch diese Kombination aus qualitativen und quantitativen Elementen sollte ein möglichst differenziertes Bild der Nutzungserfahrung entstehen. Die offenen Antworten erlauben eine vertiefende Interpretation individueller Rückmeldungen, während die Skalenfragen eine strukturierte und vergleichbare Auswertung ermöglichen.



Wie gut treffen folgende Aussagen zu:

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/ Teils	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu
Die Inhalte waren so aufbereitet, dass ich sie gut nachvollziehen konnte.	○	○	○	○	○
Die AR-Anwendung hat mir geholfen, die Systematik besser zu verstehen	○	○	○	○	○
AR-Anwendungen erleichtern das Lernen auch in anderen Themengebieten	○	○	○	○	○
Die AR-Anwendung hat mir Spaß gemacht	○	○	○	○	○

Wie gut treffen folgende Aussagen zu:

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/ Teils	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu
Die Inhalte waren so aufbereitet, dass ich sie gut nachvollziehen konnte.	○	○	○	○	○
Die VR-Anwendung hat mir geholfen, die Systematik besser zu verstehen	○	○	○	○	○
VR-Anwendungen erleichtern das Lernen auch in anderen Themengebieten	○	○	○	○	○
Die VR-Anwendung hat mir Spaß gemacht	○	○	○	○	○

Abbildung 42 Bewertungsskala für die AR- und VR-Anwendung

Zusammenfassung des Auswertungsansatzes

Insgesamt folgt die Auswertung einem mehrstufigen Ansatz, der quantitative Wissenszuwächse, qualitative Freitextantworten sowie subjektive Einschätzungen zur Lernumgebung miteinander kombiniert. Die Trennung zwischen Vorher- und Nachher-Erhebung, die differenzierte Bewertung der Antworten sowie die getrennte Betrachtung der Versuchsgruppen bilden die methodische Grundlage für die anschließende Ergebnisdarstellung.

Auswertung der Ergebnisse

Deskriptive Darstellung der Ergebnisse (Boxplots)

Zur anschaulichen Gegenüberstellung der Gruppen wurden die zentralen Ergebnisse zusätzlich in Form von Boxplots dargestellt (siehe entsprechende Abbildungen). Dabei ist zu beachten, dass sich die Skalen je nach Frage unterscheiden: Bei den Wissensfragen zur Quantenmechanik bildet die y-Achse den Wissenszuwachs-Score (Nachher minus Vorher) ab, der Werte von –4 bis +4 annehmen kann. Positive Werte kennzeichnen einen Zuwachs, negative Werte einen Rückgang bzw. Fehlkonzepte, und 0 steht für keine Veränderung. Bei den Evaluationsitems handelt es sich um Likert-Skalen (typischerweise 1–5), bei denen höhere Werte eine stärkere Zustimmung bzw. positivere Bewertung ausdrücken. Die folgenden Abschnitte fassen die Befunde der insgesamt acht Boxplots zusammen und ordnen sie im Sinne einer deskriptiven Auswertung ein.

Wissenszuwachs: Allgemeine Quantenmechanik
Bei den beiden allgemeinen Wissensfragen zur Quantenmechanik („Klassische und quantenmechanische Systeme“ sowie „Was ist ein Photon?“) zeigt sich in den Boxplots ein ähnliches Muster. In der klassischen Gruppe liegen die typischen Zuwächse (Medianwerte) jeweils höher als in den AR- und VR-Gruppen. Gleichzeitig ist die Streuung in der klassischen Gruppe deutlich größer, was auf heterogenere Lernzuwächse hinweist. Zudem treten einzelne starke negative Ausreißer auf, die auf vereinzelte Fälle mit deutlichem Rückgang bzw. Fehlkonzepten hindeuten. AR und VR liegen bei beiden Items nah beieinander und wirken insgesamt homogener (engere Boxen, geringere Streuung). Beim Item „Was ist ein Photon?“ fällt in der VR-Gruppe zusätzlich auf, dass viele Werte stark um 0 gebündelt sind, was darauf hindeutet, dass bei einem größeren Teil der Teilnehmenden keine Veränderung zwischen Vorher- und Nachher-Wert vorliegt. Insgesamt deutet die deskriptive Darstellung darauf hin, dass die klassische Gruppe im Bereich des allgemeinen Wissenszuwachses tendenziell höhere zentrale Werte erreicht, die Ergebnisse jedoch weniger stabil ausfallen als in AR und VR. Eine mögliche Erklärung wäre hier z.B. die unterschiedliche Präferenz von Personen für die klassische Form des Frontalunterrichts.

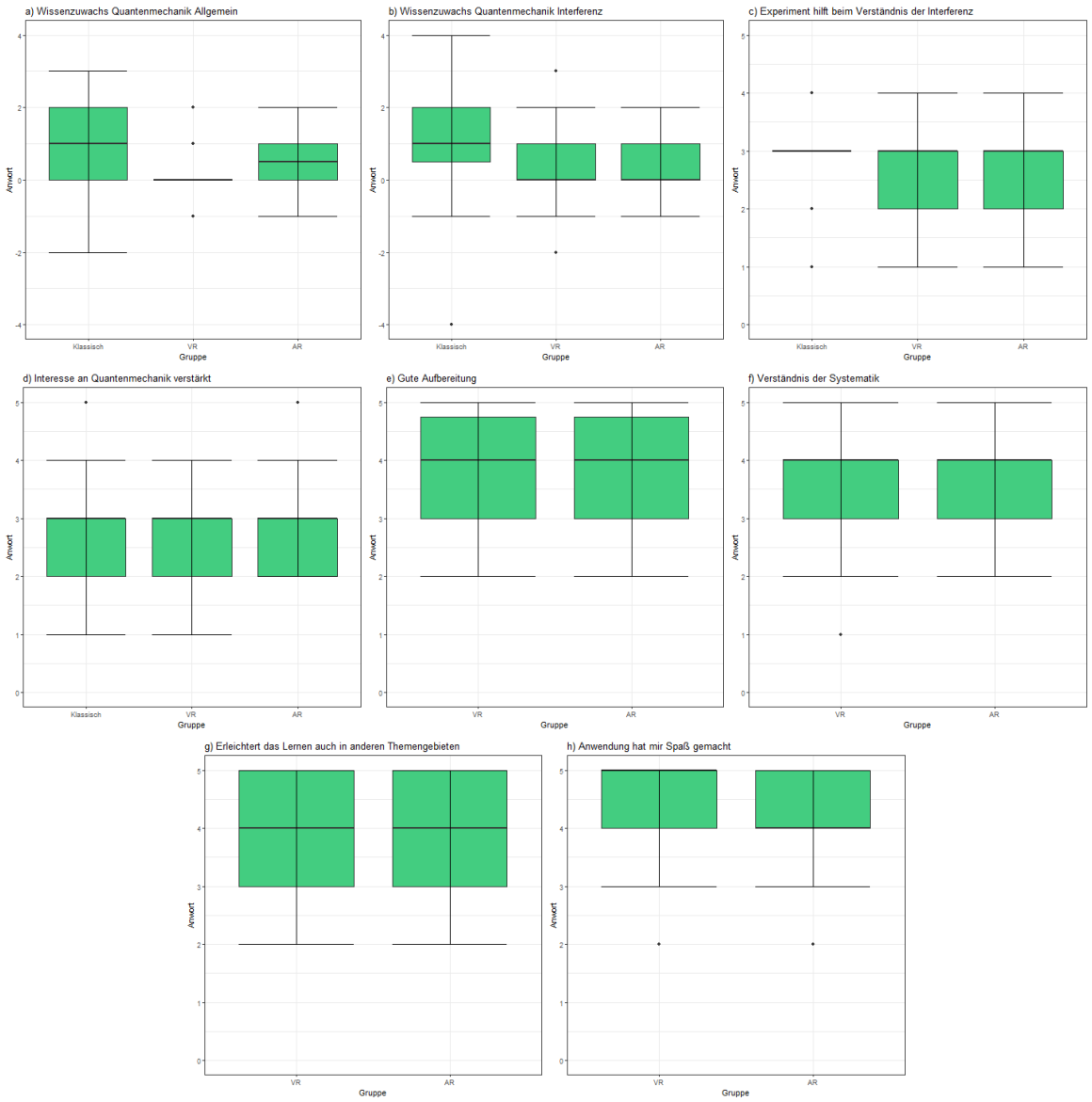


Abbildung 43 Auf der X-Achse sind die Gruppen klassisch, VR und AR.Auf der Y-Achse von a) und b) sind die Differenzen zwischen vorher/nachher des Theorieteils (-4 bis +4 Skala) Auf der Y-Achse der Plots c) bis h) sind die Bewertungen von den Probanden auf einer 0-5

Motivation: Interesse

Für das motivationale Item „Interesse verstärkt“, das für alle drei Lernsettings erhoben wurde, zeigen die Boxplots sehr ähnliche Verteilungen zwischen Klassisch, VR und AR. Die Mediane liegen in allen Gruppen im unteren bis mittleren Zustimmungsbereich, und auch die Streuung ist insgesamt vergleichbar. Vereinzelt treten sehr hohe Zustimmungswerte auf, ohne dass sich daraus ein konsistenter gruppenspezifischer Trend ableiten lässt. Deskriptiv ergibt sich damit kein Hinweis auf deutliche Unterschiede zwischen den Lernsettings in Bezug auf eine wahrgenommene Interessensteigerung.

Nutzungserfahrung: Spaßfaktor (AR/VR)

Der Spaßfaktor („Anwendung hat mir Spaß gemacht“) wird in AR und VR sehr hoch bewertet; die Werte konzentrieren sich stark auf die oberen Skalenpunkte. Bei wenigen Teilnehmenden treten einzelne niedrigere Bewertungen als Ausreißer auf. In der

deskriptiven Gegenüberstellung ergibt sich kein erkennbarer Unterschied zwischen AR und VR.

Evaluation der Anwendungen: wahrgenommener Lernnutzen und Aufbereitung (AR/VR)
Die Evaluation der AR- und VR-Anwendungen wurde über mehrere Likert-Items abgebildet, die nur in den jeweils relevanten Gruppen erhoben wurden. Über diese Items hinweg zeigen sich in den Boxplots durchgehend sehr ähnliche Verteilungen zwischen AR und VR. Für „Systematik besser verstehen“ liegen die Antworten in beiden Gruppen überwiegend im oberen Zustimmungsbereich (Median etwa bei 4); die Verteilungen sind nahezu deckungsgleich, wobei in VR ein einzelner deutlich niedriger Wert als Ausreißer sichtbar ist. Auch das Item „gute Aufbereitung“ wird in beiden Gruppen klar positiv eingeschätzt, mit einem Median im Bereich 4 und einer Verteilung, die überwiegend den oberen Skalenbereich abdeckt. Das Transfer-Item „Erleichtert das Lernen auch in anderen Themengebieten“ zeigt ebenfalls hohe Zustimmungswerte in beiden Gruppen (Median etwa 4), bei einzelnen Teilnehmenden jedoch zurückhaltende Bewertungen, was sich in unteren Whiskern bis in den Bereich niedrigerer Skalenpunkte widerspiegelt. Insgesamt spricht diese deskriptive Verteilung dafür, dass AR und VR hinsichtlich des wahrgenommenen Nutzens, Aufbereitung und Transfererwartung ähnlich positiv bewertet werden.

Wahrgenommene Unterstützung: Bewertung der Hilfe (Klassisch/VR/AR)
Beim Item zur „Bewertung der Hilfe“, das für alle drei Gruppen vorliegt, zeigt sich ein leicht abweichendes Bild: In der klassischen Gruppe sind die Bewertungen stark gebündelt um einen mittleren Wert, was auf eine insgesamt sehr einheitliche Einschätzung innerhalb dieser Gruppe hindeutet. In AR und VR ist die Verteilung demgegenüber breiter, wobei beide Gruppen in Lage und Streuung wiederum sehr ähnlich ausfallen. Die meisten Werte liegen in beiden immersiven Gruppen im mittleren Bereich, gleichzeitig treten sowohl niedrigere als auch höhere Einzelbewertungen auf.

Zusammenfassende Einordnung
Zusammenfassend lässt sich über alle acht Boxplots hinweg festhalten, dass VR und AR in ihren Verteilungen meist sehr nah beieinander liegen und insgesamt eher homogene Antwortmuster zeigen. Die klassische Gruppe weist bei den allgemeinen Wissenszuwächsen tendenziell höhere Medianwerte auf, jedoch bei deutlich größerer Streuung und einzelnen auffälligen Ausreißern. In den Anwendungs-Evaluationsitems ergibt sich für beide immersiven Settings ein überwiegend positives Bild, ohne dass sich in der deskriptiven Betrachtung ein klarer Vorteil von AR gegenüber VR oder umgekehrt abzeichnet.

Insgesamt hätten wir größere Unterschiede bezüglich VR und AR erwartet und insgesamt bessere Ergebnisse in Bezug auf den Wissenszuwachs. Die Gründe hierfür vermuten wir in den technischen Problemen, die sich insbesondere in den ersten Durchläufen zeigten. So litten die haptischen Komponenten unter einer Reihe von mechanischen Problemen, die erst im Laufe der weiteren Entwicklung behoben werden konnten.

Die letzten Versionen des Aufbaus haben sich aber als so stabil und zuverlässig erwiesen, dass entschieden wurde, das Experiment dauerhaft im Curriculum der Hochschule Niederrhein zu verankern. So wird ein solcher Workshop zukünftig in der Veranstaltung “Assistenzsysteme” für Informatiker und Elektrotechniker (3 Semesterwochenstunden, jedes Wintersemester) durchgeführt. Ziel ist es, zum einen Wissen über die Grundlagen der Quantentechnologie zu vermitteln und zum anderen den Studierenden die Interaktion mit einem echten Assistenzsystem (im Ausbildungsbereich) zu ermöglichen.

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gemäß Gesamtfinanzierungsplan standen für das Projekt 356.290,00 Euro zzgl. 71.258,00 Euro Pauschale zur Verfügung. Tatsächlich verausgabt wurden 350.210,98 Euro zzgl. 70.042,19 Euro Pauschale. Damit liegen die Ausgaben um 1,7 % unter dem Budget. Somit stimmen SOLL und IST fast überein. Die Ausgabenpositionen stellen sich folgendermaßen dar:

Ausgaben 01.12.2021-31.08.2025 pro Position:

812 117.733,17 €

817 157.236,52 €

822 14.431,85 €

831 372,60 €

843 11.559,01 €

846 347,55 €

850 48.530,28 €

Summe: 350.210,98 €

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Im Projekt QuFabLAbs waren bei Antragstellung insgesamt 36 Personenmonate auf Seiten der Hochschule Niederrhein geplant bei einer Laufzeit von 3 Jahren. Das Projekt wurde kostenneutral um 9 Monate verlängert, weshalb sich die Personenmonate um 4 Monate erhöhten.

Diese Personenmonate waren notwendig und angemessen, um die Aufgaben im Projekt zu erfüllen und auf die im Projektverlauf entstandenen neuen Herausforderungen zielgerichtet einzugehen. Insbesondere die Entwicklung geeigneter Artefakte, die Zusammenstellung der Lernmaterialien und die Durchführung der Evaluierung haben einen nicht unerheblichen Recherche-, Entwicklungs- und Organisationsaufwand erzeugt.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Auf wissenschaftlichem Gebiet sind die erzielten Lösungen sehr interessant und vielversprechend. Insbesondere auch die während der Evaluation erworbenen Erfahrungen und Erkenntnisse werden den Stand der Wissenschaft auf den Gebieten bereichern können.

Die Forschungsanstrengungen sowie die zu erzielten Ergebnisse passen exakt in das aktuelle Kompetenzprofil und die Forschungsaktivitäten der Hochschule (siehe z.B. Kompetenzzentrum FAST) und haben daher das Know-how und die Erfahrungen der Hochschule vergrößert. Die HSNR plant kurzfristig, die Ergebnisse in andere Forschungsaktivitäten einzubringen und weiterzuführen.

Die Anschlussfähigkeit, die Fortführung und die innovative Weiterentwicklung von QuFabLabs als offene Bildungs- und Kollaborationsumgebungen für Unternehmen, Forscher:innen und den wissenschaftlichen Nachwuchs wird durch die Projektpartner:innen gesichert. So betreibt die HSNR selbst auch einen Makerspace und wird über die Anbindung zum QuFabLab das Angebot um Quantentechnologien erweitern können.

Die im Projekt entwickelten Lösungen wurden und werden ebenso regelmäßig bei öffentlichen Veranstaltungen der HSNR vorgestellt, um Forschende und Unternehmen für die Lösungen zu interessieren.

Abbildung 44 Informationsstand mit Ausstellung des QuFabLabs AR-Systems bei den HSNR Engineering Days 2026

Die freie Verfügbarkeit der entstandenen Materialien ermöglicht ihre weite und nachhaltige Verbreitung über die Grenzen des Konsortiums hinaus. Dies wird die HSNR in der Schülerlabor und Maker-Szene durch Werbemaßnahmen und Ansprachen weiter vorantreiben. Eingebunden in Mittelstandsinitiativen und vernetzt mit regionalen KMU wird die HSNR daran arbeiten, F&E-Folgeprojekte zu beantragen und über den Wissenstransfer dazu beitragen, den Aufbau von Kompetenzen in Unternehmen zu unterstützen und die Entwicklung von Fachkräften zu fördern.

Die Projektergebnisse sind dafür geeignet, weitere Branchen und schwer vermittelbare Inhalte zu adressieren und über die Entwicklung der virtuellen Lehrmaterialien, in Kombination mit haptischen Artefakten, neue Forschungs- und Anwendungsszenarien zu eröffnen.

Die Hochschule Niederrhein verfolgt neben der Dissemination der Projektergebnisse auf Fachkongressen und in wissenschaftlichen Zeitschriften eine gezielte wissenschaftliche Verwertung im Sinne einer nachhaltigen Forschungs- und Lehrintegration. Die im Projekt entwickelten technischen Lösungen, didaktischen Konzepte und empirischen Evaluationsergebnisse bilden die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten. Geplant ist weiterhin die systematische Einbindung von Studierenden in Form von Bachelor- und Masterarbeiten sowie perspektivisch auch Promotionsvorhaben, die sowohl technische Fragestellungen (z. B. Tracking-Algorithmen, Interaktionsdesign, Systemarchitekturen für MR-Umgebungen) als auch mediendidaktische Aspekte (z. B. Wirkung haptischer Interaktion auf konzeptuelles Verständnis, Cognitive-Load-Analysen, Constructive Alignment in immersiven Lernumgebungen) vertiefen.

Darüber hinaus stärkt die im Projekt aufgebaute Expertise im Bereich immersiver Lehr-Lern-Technologien, haptischer Artefakte und quantentechnologischer Experimentiersysteme die Position der Hochschule in der wissenschaftlichen Community. Die erhöhte Sichtbarkeit schafft günstige Voraussetzungen für die Einwerbung weiterer Drittmittelprojekte, insbesondere an der Schnittstelle von Quantentechnologie, digitaler Hochschullehre, Mensch-Technik-Interaktion und Educational Technology.

Ein besonderer Schwerpunkt der wissenschaftlichen Weiterverwertung liegt auf der Erforschung und Weiterentwicklung virtueller und hybrider Lehrformate. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Gestaltung haptischer Artefakte in Kombination mit VR-/AR-Technologien liefern wertvolle empirische und konzeptionelle Impulse für zukünftige Lehr-Lern-Settings. Insbesondere die Frage, wie physische Interaktion in digitalen Umgebungen lernwirksam integriert werden kann, stellt ein zentrales Forschungsfeld dar. Die Kombination realer Artefakte mit immersiver Visualisierung eröffnet hier innovative Ansätze für experimentelle Lehre in technisch-naturwissenschaftlichen Disziplinen.

Die nachhaltige curriculare Verankerung der Projektergebnisse erfolgt konkret durch die Integration des entwickelten Workshops zum kombinierten AR-/MR-Experiment am Michelson-Interferometer in die Lehrveranstaltung „Assistenzsysteme“ für Studierende der Informatik und Elektrotechnik (3 SWS, jeweils im Wintersemester). Der Workshop dient dabei nicht nur der Vermittlung quantentechnologischer Grundlagen, sondern auch der praktischen Auseinandersetzung mit einem real eingesetzten Assistenzsystem im Ausbildungskontext. Die Studierenden analysieren, implementieren und reflektieren dabei

Interaktionsmechanismen, Visualisierungskonzepte sowie Systemarchitekturen. Dadurch wird sowohl fachliches Wissen im Bereich Quantentechnologie aufgebaut als auch ein vertieftes Verständnis für die Entwicklung und Evaluation technischer Assistenzsysteme gefördert.

Darüber hinaus ist eine breitere Verwertung innerhalb der Hochschullehre und wissenschaftlichen Weiterbildung vorgesehen. Die entwickelten Konzepte und Artefakte sollen in bestehende Veranstaltungen integriert und perspektivisch in neue Module – insbesondere auf Master-Niveau in Elektrotechnik und Informatik – eingebunden werden. Ebenso ist eine Nutzung in Weiterbildungsangeboten, etwa für Lehrkräfte oder Industriepartner, denkbar, um den Transfer quantentechnologischer Kompetenzen in Schule und Wirtschaft weiter zu stärken.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es lagen keine Ergebnisse dritter Seite vor oder waren bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Entwicklungsarbeiten am haptischen MR-System haben sich leider als deutlich aufwendiger und zeitraubender erwiesen als zu Projektstart angenommen wurde. Daher konnte im Projektzeitraum keine ausreichend hohe und aussagekräftige Anzahl an Experimenten mit Probanden erzielt werden, um die Frage nach der Nützlichkeit und Wirksamkeit solcher MR-basierten Lernsysteme, insbesondere in Kombination mit haptischen Komponenten, abschließend zu klären. Die ersten Experimente sind vielversprechend, aber noch nicht ausreichend aussagekräftig. Da im Rahmen der weiteren curricularen Nutzung in Zukunft weitere Probanden-Tests hinzukommen werden, ist geplant, die Ergebnisse in Zukunft wissenschaftlich aufzubereiten und zu veröffentlichen.

Weiterhin stellt die HSNR die Design-Files und die Software des MR/Haptik-Systems als Open Source zur Verfügung. Ebenso ist auch der Moodle-Kurs verfügbar und kann frei von anderen genutzt werden.