

## 1. Einleitung

Die Quantenphysik fasziniert nicht nur Physikerinnen und Physiker, sondern findet auch immer mehr Interessenten in der breiten Bevölkerung (Herbst et al. 2016). Technische Erfindungen wie Magnetresonanztomographen (Semmler et al. 2002), Flash Speicher (Schefer 2011) und Photovoltaik-Anlagen (Fuhs 1993) begleiten uns im Alltag und basieren auf den Grundlagen der Quantenphysik. Moderne Verschlüsselungen, welche auf der Quanteninformation basieren (Beutelspacher et al. 2015), werden entwickelt, um eine sichere Kommunikation herzustellen. Ein Abhören oder Ausspähen von Passwörtern soll dadurch unmöglich sein (Schimpf et al. 2021). Quantencomputer, wie beispielsweise von IBM im Jahr 2019 hergestellt, sollen zudem eine neue Generation der Informationsverarbeitung einläuten (Calarco 2021). Spätestens seit die Physik mit *The Big Bang Theory* in das Fernsehprogramm Einzug genommen hat, wurde sie populärwissenschaftlich einem sehr großen Publikum eröffnet (Müller 2019). Neben den Schauspielern, welche mit vielen Klischees von Physikerinnen und Physikern die Zuschauer fesseln, besticht die Serie vor allem durch die Gastauftritte von Stephen Hawking (Wille 2018). Für die fachliche Richtigkeit der Sitcom ist Prof. Dr. David Saltzberg als Berater für das Autorenteam des Drehbuchs zuständig (Haas 2013). Es kann daher vorkommen, dass sich Physiklehrende mit Fragen von Schülerinnen und Schülern konfrontiert sehen, welche aus solchen populärwissenschaftlichen Quellen stammen.

Um die Fragen der Lernenden fachlich korrekt und adressatengerecht beantworten zu können, müssen Lehrkräfte fundierte Kenntnisse der Quantenphysik besitzen. Die Notwendigkeit einer Quantenphysik für Lehramtsstudierende der Sekundarstufe I wurde auch von den Hochschulen in Baden-Württemberg im Zuge der Umstrukturierung der Lehramtsstudiengänge erkannt. Die Fachpapiere für das Lehramt Physik (Kultusministerium 2015) haben diese Notwendigkeit zwar konkretisiert, jedoch lassen sich auch Fragen daraus ableiten: Welche konkreten Inhalte sollen die Studierenden nach einer Veranstaltung zur Quantenphysik kennen? Mit welchen Voraussetzungen kommen die Studierenden in eine entsprechende Veranstaltung?<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> In den Fachpapieren werden die Studieninhalte „Einblicke in die Atom- und Quantenphysik“ (Kultusministerium 2015) gefordert. Das fachspezifische Kompetenzprofil sieht vor, dass die Absolventinnen und Absolventen unter anderem mit „grundlegenden Begriffen und Methoden der Mathematik zur Beschreibung physikalischer Sachverhalte“ (Kultusministerium 2015) vertraut sind.

## 1.1 Ziele

Zur Beantwortung der Fragen nach dem Inhalt und den Eingangsvoraussetzungen für eine Quantenphysik ist es notwendig, sich sowohl mit Modulplänen der Pädagogischen Hochschulen als auch mit Lehrbüchern und Konzepten zur Quantenphysik zu beschäftigen. Bei der Betrachtung von Vorlesungen zur Quantenphysik an Universitäten wird ersichtlich, dass die Grundlagen auf Phänomenen aufgebaut werden, welche bei Quantenobjekten mit einer Ruhemasse beobachtbar sind (Zoller 2014). Erste Experimente, in welchen das Interferenzmuster als klassische Welleneigenschaft von Elektronen nachgewiesen werden konnte, wurden in Tübingen durchgeführt (Möllenstedt & Jönsson 1959). Dieses Experiment führt sogar die *Top Ten der schönsten physikalischen Experimente* an (Fäßler & Jönsson 2005). In den vergangenen Jahren wurden weitere Experimente durchgeführt, in welchen die Interferenzmuster von Quantenobjekten mit einer Ruhemasse nachgewiesen werden konnten. Dazu wurden beispielsweise Heliumatome in Konstanz (Kurtsiefer et al. 1997) und auch C<sub>60</sub>-Moleküle in Innsbruck an einem Doppelspalt gebeugt (Arndt et al. 1999).

Die Bilder originaler Forschungsergebnisse (Abbildung 4) eignen sich gut, um die subjektiven Theorien der Lernenden für Quantenobjekte im Doppelspaltexperiment zu erheben. Der auftretende kognitive Konflikt kann genutzt werden, um eine neue Theorie zu begründen (Krüger 2007). Jedoch wird ein solches Vorgehen oft vergeblich gesucht. Vorlesungen an Universitäten orientieren sich oft an bestehenden Lehrbüchern zur Quantenmechanik, in welchen die Schrödingergleichung häufig postuliert wird (Nolting 2013; Schwabl 2007). Die Schrödingergleichung soll demnach nicht hinterfragt und als gültig angesehen werden. Wenn die Gleichung nicht hinterfragt wird, kann zumindest das Vorgehen in Frage gestellt werden. Studierende von Universitäten mögen sich mit einer postulierten Gleichung zufriedengeben, jedoch können Lernende mit geringen mathematischen Fähigkeiten mit der Schrödingergleichung möglicherweise zunächst nichts anfangen. Dieses Problem wird deutlicher, je früher die Quantenphysik im Fokus der Lehre steht. Im schulischen Umfeld ist ein Einstieg mit der Schrödingergleichung vollkommen ausgeschlossen. Weder Differentialgleichungen noch Differentialoperatoren sind für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II verbindlich bekannte Konstrukte (Kultusministerium 2016a; Kultusministerium 2016b). Brachner und Fichtner nahmen sich diesen Problemen erstmals an (Brachner & Fichtner 1977). Mit zunehmender Bedeutung der Quantenphysik im Alltag wird auch die Rolle der Quantenphysik im schulischen Kontext immer wichtiger. Viele Didaktiker und Schulbuchautoren entwickelten Konzepte, mit welchen die Quantenphysik auf schulischem Niveau unterrichtet werden kann. Einfache und anschauliche Experimente sind nötig, welche im Idealfall an der Schule selbst durchgeführt werden können.

Der photoelektrische Effekt wird häufig verwendet, um die Quantenphysik zu begründen (vgl. Müller 2003). Dieser Effekt lenkt die Quantenphysik jedoch in Richtung Diskretisierung des elektromagnetischen Felds. Ein sehr abstrakter Teil der Quantenphysik. Diese Diskretisierung findet sich in der universitären Lehre und in Fachbüchern erst in den fortgeschrittenen Veranstaltungen und Büchern (Schwabl 2008). Sie ist jedoch auf schulischer Ebene relevant, da die Lehr- und Bildungspläne der Bundesländer das Photon als Quantenobjekt fordern (Kultusministerium 2016b). Die Ausgangslage für Lehrerinnen und Lehrer ist demnach sehr kompliziert. Die zunehmende Bedeutung der Quantenphysik wird in den Lehrplänen immer deutlicher abgebildet. Unanschauliche Konzepte aus der modernen Physik sollen nun Schülerinnen und Schülern beigebracht werden, welche allenfalls aus populärwissenschaftlichen Quellen unvollständige oder teilweise sogar fehlerhafte Bilder als Vorwissen mitbringen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Vorlesungen zur Quantenmechanik an Hochschulen das Konzept des Photons oft nicht behandeln (Konstanz 2021). Im Fall von angehenden Physiklehrerinnen und Physiklehrern für die Sekundarstufe I ist eine Quantenphysik erst mit der Umstrukturierung der Studiengänge im Zuge des Bologna-Prozesses in die Studienpläne eingezogen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, nach dem design-based-research Ansatz (Krüger et al. 2013) ein Lehrkonzept zu entwickeln, mit welchem angehende Lehrerinnen und Lehrer der Sekundarstufe I in der Quantenphysik unterrichtet werden können. Nicht nur die mathematischen Kompetenzen müssen bei der Entwicklung eines solchen Lehrkonzepts berücksichtigt werden, sondern auch die Kompetenzen in der Quantenphysik, die Lehrerinnen und Lehrer in ihrem späteren Berufsalltag gemäß dem Fachpapieren für das Lehramt Physik (Kultusministerium 2015) benötigen.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird eine zusammenfassende Übersicht über bestehende Lehrkonzepte und Bücher gegeben, welche sich mit der Einführung in die Quantenphysik beschäftigen. Die Fachbücher geben Aufschluss über die Grundlagen der Quantenphysik, die Schulbücher hingegen können das Unterrichtsziel des neu entwickelten Lehrkonzepts definieren, da sich Schulbücher stets an Lehr- und Bildungsplänen orientieren. Zudem eignen sich Schulbücher und bereits bestehende Lehrkonzepte gut, um die unterschiedlichen Einstiege in die komplexen Themen der Quantenphysik zu finden. Ein verwendeter Einstieg muss an die Zielgruppe angepasst, transparent und nachvollziehbar sein.

Das Lehrkonzept als fachdidaktische Neuentwicklung, welches auf den symbolischen Ansatz von Julian Schwinger (Schwinger 2001) zurückzuführen ist, wird im Teil II dieser Arbeit dargestellt. Es kann in der dargestellten Version direkt in der Lehre eingesetzt werden. Übungsaufgaben mit Lösungen unterstützen den Lehrbetrieb und können für eine Vertiefung der Inhalte genutzt werden.

Der dritte und abschließende Teil dieser Arbeit stellt die Ergebnisse einer ersten Evaluation dar. Die verwendeten Fragebögen nach Müller (Müller 2003), die Auswertmethode sowie die Probandengruppen und Studienabläufe werden dargestellt und beschrieben. An einigen Stellen wird im Zuge der Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form gewählt, da einige Probandengruppen nur aus männlichen Teilnehmern bestanden. Die Beschreibung der Ergebnisse in Teil III beziehen sich jedoch auf weibliche und männliche Studierende bzw. Lernende gleichermaßen.

## 2. Konzepte zur Quantenphysik

In den vergangenen 100 Jahren hat nicht nur die Quantenphysik große Fortschritte gemacht. Auch die Didaktik der Quantentheorie ist in diesen Jahren entstanden (Müller et al. 2021). Viele Lehrbücher und Lehrkonzepte wurden entwickelt, um die Quantenmechanik an Schulen und Hochschulen den Lernenden zu vermitteln. Wie bei anderen Themen in der Physik existieren in der Quantenphysik verschiedene Ansätze und Beispiele, welche zentral im Fokus der Bücher und Konzepte stehen (Müller 2003).

In diesem Kapitel werden die Ansätze, der Fortgang und die zentralen Elemente zu bereits bestehenden ausgewählten Lehrbüchern und Lehrkonzepten zur Quantenmechanik und Quantenphysik betrachtet. Die Lehrbücher weisen, je nach Zielgruppe, ähnliche Ansätze und Ausrichtungen auf. Unterschiede sind zwischen deutschsprachigen (Nolting 2013; Schwabl 2007) und englischsprachigen Büchern (Schwinger 2001) zu erkennen. Neben den Lehrbüchern existieren zudem einige Lehrkonzepte zur Quantenmechanik, welche überwiegend die Schulphysik im Fokus haben (Müller 2003; Hübel 2018a). Die Schulbücher unterscheiden sich oft dadurch, dass sich einige Autoren auf den Bildungsplan eines Bundeslands beschränken (Kienle & Pardall 2013). Andere Autoren hingegen haben die Bücher allgemeiner gehalten, weshalb die Bücher unabhängig vom Bundesland einsetzbar sind (Apolin 2019a; Apolin 2019b; Dorn & Bader 2000; Grehn & Krause 2020). Das fachliche Ziel der Lehr- und Schulbücher bestimmt den Aufbau und die Komplexität der Bücher. Die Unterschiede in den Büchern und Konzepten lassen sich in drei Kategorien einteilen, welche im Folgenden gleichzeitig als Auswahlkriterium angesehen werden.

Schulbücher, welche sich auf ein Bundesland oder eine Schulart beschränken, sind fachlich eng an den entsprechenden Bildungsplan angepasst. Die Studentafeln und Metaaufgaben geben das Niveau und den Anspruch der Bildungspläne wieder. Fach- und Schulbücher mit einem großen Themenüberblick, aber geringer Tiefe, weisen gelegentlich sprachliche Ungenauigkeiten auf. Es wird der Eindruck erweckt, als ob die fachliche und sprachliche Präzision zugunsten anschaulicher und einfacher Bilder zurückgestellt wird. Der mathematische Anspruch ist meist gering, weshalb die Anschlussfähigkeit an weitere Inhalte der Quantenphysik erschwert ist.

Für Lehrkräfte ergeben sich neben der fachlichen Tiefe weitere Kriterien. Die eingesetzten Bücher und Konzepte müssen wirksam und effizient sein. Die *Lernwirksamkeit* korreliert mit der *Anschlussfähigkeit* und der *fachlichen Tiefe* der Schulbücher. Nur wenn der richtige Inhalt in der angemessenen Tiefe vermittelt wird, kann eine entsprechende Wirksamkeit er-

reicht werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Inhalte im vorgegebenen zeitlichen Rahmen vermittelbar sind. Dadurch werden ausführliche Bücher und Lehrkonzepte ggf. nicht eingesetzt, da mit ihnen nicht in angemessener Zeit unterrichtet werden kann.

## 2.1 Lehrbücher

Im deutschsprachigen Raum sind Lehrbücher, welche sich ausschließlich mit der Quantenphysik befassen, für Hochschulen ausgelegt. Zwei bekannte und weit verbreitete Lehrbücher sind von Wolfgang Nolting (Nolting 2013) und von Franz Schwabl (Schwabl 2007)<sup>2</sup>.

Sowohl das Buch von Schwabl als auch von Nolting führen das Versagen der klassischen Physik über einen herkömmlichen Weg ein - durch die Hohlraumstrahlung (Nolting 2013; Schwabl 2007). Das Plancksche Wirkungsquantum und die Heisenbergsche Unschärferelation werden in beiden Büchern zu Beginn postuliert. Über mathematische Erkenntnisse und experimentelle Phänomene werden Quanteneigenschaften eingeführt und aufgezeigt. Während Schwabl mit dem photoelektrischen Effekt und dem Compton-Effekt an die Hohlraumstrahlung anknüpft (Schwabl 2007), bleibt Nolting bei massebehafteten Teilchen wie Elektronen (Nolting 2013).

Beide Autoren verwenden das Stern-Gerlach-Experiment als ein zentrales Experiment der Quantenmechanik in den experimentellen Grundlagen. Der Spin als diskrete, quantenmechanische Größe wird mit Hilfe von Elektronen eingeführt, welche durch ein stark inhomogenes Magnetfeld transmittiert werden. Hierbei ist keine kontinuierliche Verteilung sichtbar, sondern ausschließlich zwei diskrete Richtungen. Unterschiedliche Einheitensysteme führen zu teilweise unterschiedlichen Formeln, weshalb die Anschlussfähigkeit (vor allem im mathematischen Sinn) des Buchs von Schwabl geprüft werden muss.

Beide Lehrbücher weisen durch die quantitative Betrachtung vieler klassischer und moderner Experimente bereits früh eine gewisse Komplexität an mathematischen Strukturen auf (Nolting 2013; Schwabl 2007). Zudem werden in beiden Büchern in den Kapiteln zur Begründung der Quantenphysik Differentiale, der Gradient und komplexe Zahlen benötigt. Differentiale sind vor allem auch wegen des Gradienten erforderlich, welcher für die Herleitung des Spins benötigt wird (Schwabl 2007). Die starke Mathematisierung wird von Julian Schwinger aufgegriffen und umgangen (Schwinger 2001).

Schwinger wählt einen symbolischen Zugang zur Quantenmechanik. Diese Symbolik soll bewirken, dass die mathematische Komponente erst später eine Rolle in der Quantenmecha-

---

<sup>2</sup> Im Folgenden wird zur Unterscheidung der Bücher oftmals nur der Autor genannt.

nik einnimmt. Er wählt das Stern-Gerlach-Experiment zum Nachweis des Spins als quantenmechanische Größe (Schwinger 2001). Anstatt eine konsistente mathematische Herleitung anzustreben, verwendet Schwinger die Symbolik, angelehnt an die Dirac-Notation<sup>3</sup>, um das Experiment zu beschreiben. Die Zustandsvektoren (state vectors) bekommen zunächst einen symbolischen, qualitativen Charakter. Die Präparation eines Zustands wird durch einen Bra-Vektor  $\langle a' |$  dargestellt, die Messung durch einen Ket-Vektor  $| a'' \rangle$  (Schwinger 2001).<sup>4</sup> Die Abfolge mehrerer Bra- und Ket-Vektoren hintereinander wird eingeführt und eine Auswahlregel verschiedener Eigenschaften beschrieben. Eine solche Abfolge kann abstrakt als Selektion gesehen werden, bei welcher gewisse Eigenschaften ausgewählt werden. Dadurch wird der Zustand „umpräpariert“ (Müller 2003, S. 208).

Da der Spin eine abstrakte quantenmechanische Größe ist, werden oft plakative Bilder des Spins durch Pfeile verwendet (Apolin 2019b). Auch wenn bei Schwabl und Nolting dieses Bild nicht verwendet wird, wird es als Hilfskonstrukt gelegentlich ergänzend erwähnt. Spätestens mit der Verwendung von Elektronen gerät dieses anschauliche Bild jedoch an seine Grenzen. Halbzahlige Spins können durch Pfeile nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Auch bei Photonen erzeugt dieses Bild eine Fehlvorstellung. Zwar haben Photonen ganzzahlige Spins, jedoch besitzen Photonen keine Ruhemasse (Nolting 2013). Ein Pfeil als Darstellung, wie er in *Big Bang 2* zu sehen ist, wirft die Frage auf, wo der Pfeil „aufgezeichnet“ ist (Apolin 2019b). Eine Teilchenvorstellung von Photonen wird durch solche Anschauungskonzepte nicht nur suggeriert, sondern sogar explizit durch Lehrbücher propagiert. Die Aussage „Das Photon hat als Teilchen allerdings ganz besondere Eigenschaften“ (Nolting 2013, S. 57) zwingt eine klassische Teilchenvorstellung auf.

Der weitere Gang der beschriebenen deutschsprachigen Lehrbücher ist im Anschluss an die Darstellung der Unzulänglichkeit der klassischen Physik einheitlich. Die Schrödingergleichung wird postuliert oder mit Hilfe mehrerer Postulate definiert. Ebenfalls wird verwendet, dass sich mikroskopische Objekte (wie beispielsweise Elektronen) durch eine Wellenfunktion beschreiben lassen (Schwabl 2007). Mit vielen postulierten Gleichungen und definierten Größen als Grundlage werden nun quantenmechanische Phänomene hergeleitet oder beobachtete Phänomene mathematisch begründet.

---

<sup>3</sup> Bei den von Schwinger (Schwinger 2001) verwendeten Symbolen handelt es sich nicht um die von Paul Dirac im Jahr 1930 eingeführte Bra-Ket-Notation. Die Bra-Ket-Notation wird in Anlehnung an Paul Dirac auch oft als Dirac-Notation bezeichnet. Die von Schwinger verwendete Symbolik ist lediglich an die Dirac-Notation angelehnt, um einen experimentellen Ablauf des Stern-Gerlach-Experiments abstrakt darzustellen.

<sup>4</sup> Die Bezeichnungen Bra- und Ket-Vektor stammen vom englischen *bracket* (engl. Klammer) und dem Produkt von  $\langle$  | und  $| \rangle$ .