

**Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

Fakultät für Mathematik und Physik

Institut für theoretische Physik

# **Didaktische Analyse einer Unterrichtsstunde zur Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen**

**Bachelorarbeit**

im Studiengang Fächerübergreifender Bachelor Physik

von Lara Niemann

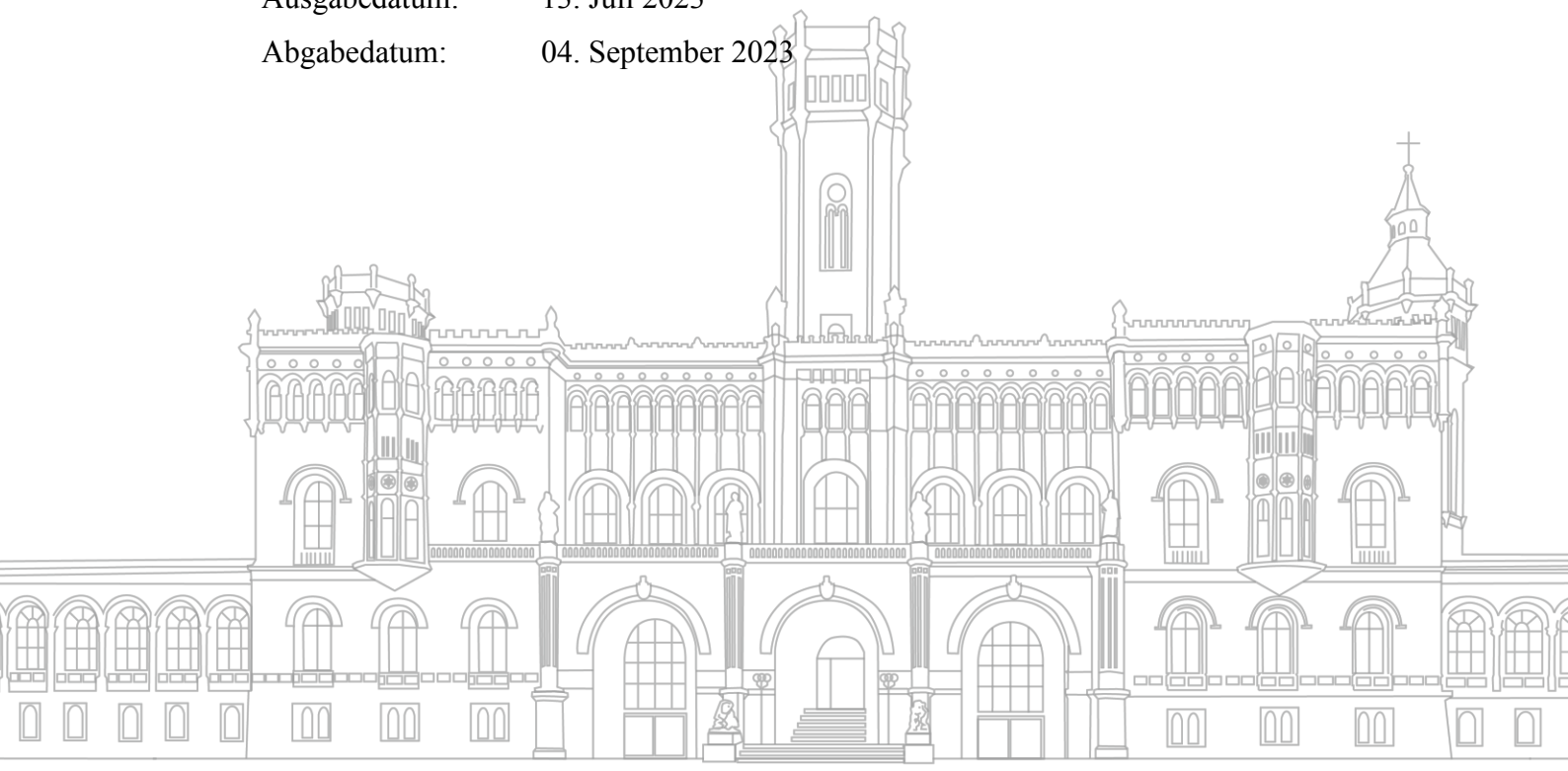
Erstprüfende/r: Prof. Dr. Tobias J. Osborne

Zweitprüfende/r: Andreea-Iulia Lefterovici

Matrikelnummer: 10039434

Ausgabedatum: 13. Juli 2023

Abgabedatum: 04. September 2023



# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	2
2 Projektbeschreibung.....	4
3 Bedingungsanalyse .....	7
3.1 Situative Voraussetzungen.....	7
3.2 Individuelle Voraussetzungen.....	10
3.3 Einschätzung zum Vorwissen.....	11
4 Sachanalyse.....	13
5 Didaktische Überlegungen.....	16
5.1 Legitimation.....	17
5.2 Didaktische Reduktion.....	19
5.3 Didaktische Strukturierung .....	24
6 Intentionalität und Stundenziele .....	28
7 Methodische Überlegungen .....	31
7.1 Aufgabenanalyse der Arbeit am Jupyter Notebook .....	33
8 Verlaufsplan.....	35
9 Reflexion der Durchführung.....	35
10 Abschließende Bewertung der Unterrichtsstunde.....	39
Literaturverzeichnis .....	42
Anhang.....	43
Interviewtranskript Kurt-Schwitters Gymnasium Misburg .....	43
Interviewtranskript Ricarda-Huch-Schule Hannover .....	45
Interviewtranskript Leibniz Schule Hannover .....	47
Beobachtungsnotizen zur Durchführung am Kurt-Schwitters Gymnasium Misburg.....	49
Beobachtungsnotizen zur Durchführung an der Ricarda-Huch-Schule Hannover.....	50
Beobachtungsnotizen zur Durchführung an der Leibniz Schule Hannover .....	51
Auswertung der Schüler*innenbefragung .....	52
Verlaufsplan.....	59
Eigenständigkeitserklärung.....	63

# 1 Einleitung

Die Geschichte der Physik zeichnet sich durch zahlreiche Entdeckungen aus. Vor allem in den letzten hundert Jahren wurden sensationelle Entdeckungen gemacht, die unser Verständnis der Welt maßgeblich verändert haben. Hierzu zählt in besonderer Weise auch die Quantentheorie (vgl. Clown, 2013, S.7f.). Die Quantenphysik inklusive der Quantenmechanik stellt eine der Säulen der modernen Physik dar. Ohne ihren theoretischen Hintergrund wären viele alltägliche Technologien, wie Computer, Smartphones und Lasergeräte, nicht realisierbar. Wirft man einen Blick auf die aktuelle Forschung im Bereich der technischen Weiterentwicklung, stehen besonders Quantencomputer im Fokus. Ziel dieser Forschung ist es, mit Hilfe der Quanteninformationstheorie, leistungsstärkere Computer zu entwickeln. Diese sollen Probleme und Rechnungen lösen, die mit der klassischen Informationsverarbeitung nicht bearbeitet werden können.

Gerade im Zeitalter der fortschreitenden Digitalisierung und einer rasanten Weiterentwicklung der Technik, gewinnt dieses physikalisch technische Thema auch im Schulkontext immer mehr an Bedeutung. Das zu erwerbende Wissen ermöglicht es Schüler\*innen, die Arbeitsweise aktueller Techniken, wie herkömmlichen Computern oder Handys, die besonders von Jugendlichen im Alltag intensiv genutzt werden, aber auch zukünftiger digitaler Geräte, zu denen speziell die Quantencomputer zählen, tiefgründig zu verstehen. Dies kann ein zurechtfinden in der digitalen und technisch geprägten Arbeitswelt erleichtern. Viele Berufe erfordern grundlegende Kenntnisse über die Funktionsweise von Betriebssystemen und technisch unterstützten Arbeitsschritten. Ein Beispiel ist die Produktions- oder Lieferbranche. Nur wenn diese Systeme und technischen Hilfsmittel in ihrer Funktion verstanden werden, können sie auch fachgerecht und möglichst effektiv bedient werden und ihren vollen Nutzen entfalten.

Aus dieser großen zukünftigen Bedeutung der technischen Umsetzung der Quanteninformationstheorie für die verschiedenen Bereiche der Gesellschaft, besteht der Anspruch einer Transformation der Themen des Quantencomputings in den Schulkontext. Bisher spielt die Quantenphysik in den Lehrplänen deutscher Gymnasien nur eine untergeordnete Rolle. Der Grund dafür basiert unter anderem auf Schwierigkeiten in der Vermittlung des komplexen Themas. Selbst die quantenmechanischen Grundlagen gründen

auf mathematischen Formulierungen und Aspekten, die völlig gegen die eigene Intuition im Vergleich zu anderen physikalischen Themen gerichtet sind.

Unter der Betrachtung der Komplexität und fehlenden Einbindung in den Unterrichtskontext stellt sich die forschungsleitende Frage, wie quantenmechanische Grundlagen in der Schule in Zukunft bestmöglich vermittelt werden können. Um diese Frage beantworten zu können und entsprechende Erkenntnisse gewinnen zu können, wurde im Zuge dreier Bachelorarbeiten ein Projekt an mehreren Gymnasien in Hannover durchgeführt. Hauptbestandteil dieses Projektes ist die Durchführung einer Doppelstunde in mehreren Kursen der gymnasialen Oberstufe. Hier werden quantenmechanische Grundlagen mithilfe von Technologien des Quantencomputings vermittelt. Inhaltliche Schwerpunkte sind der Vergleich von Bits und Qubits, klassische Gatter und Quantengatter, die Veränderung von Zuständen sowie der probabilistische Charakter der Quantenmechanik.

Nach einer genauen Vorstellung des Projektes und dessen Durchführung erfolgt eine ausführliche didaktische Analyse der Unterrichtsstunde zur Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen. Hierzu zählen neben der Bedingungsanalyse Überlegungen zur Didaktik und zur Methodik der Unterrichtsstunde, Strukturplanungen und Strukturentscheidungen, Überprüfungen der Intentionalität sowie eine datenbasierte Reflektion der durchgeführten Unterrichtsstunde. Eine solche Analyse ist wichtig, um die Kohärenz der getroffenen Planung und Umsetzung begründen zu können. Die nachgewiesenen Lernerfolge können auf diese Kohärenz und Abstimmung der Vorkenntnisse und Leistungsniveaus der Lerngruppen mit der inhaltlichen und didaktischen Umsetzung der Lerneinheit begründet werden.

Als Basis der Analyse dienen neben den Beobachtungen zur Unterrichtsdurchführung gewonnene Informationen aus den im Vorhinein geführten Interviews mit den zuständigen Lehrkräften sowie Erkenntnisse aus einer Schüler\*innenbefragung im Anschluss an die Doppelstunde. So können nach eingehender Betrachtung in die verschiedenen Richtungen genaue Kenntnisse darüber gewonnen werden, wie quantenmechanische Grundlagen erfolgsorientiert in der Schule gelehrt werden können.

Diese Erkenntnisse können auch für die Wirtschaft relevant sein und transformiert werden. Sollten die Quantencomputer eines Tages flächendeckend die digitale Arbeitswelt bereichern, müssen Theorien der Funktionsweise und quantenmechanische Grundlagen auch an das nutzende Personal vermittelt werden. Dies spiegelt erneut die Wichtigkeit und die Zweckmäßigkeit dieses Pilotprojektes wider.

## 2 Projektbeschreibung

In dem durchgeführten Forschungsprojekt wurde sich tiefgründig mit der übergeordneten Forschungsfrage „Wie können quantenmechanische Grundlagen in der Schule vermittelt werden?“ beschäftigt. Aufgrund der aktuellen Weiterentwicklung der Technik in der Forschung hin zu informationstechnischen Systemen, die nach den Prinzipien der Quantentheorie funktionieren, ist die Relevanz des Projektes auch im schulischen Kontext unumstritten. Beantwortet werden soll die Forschungsfrage durch eine praktische Umsetzung einer Vermittlungsmethode mit Jupyter Notebooks in einer Unterrichtsstunde in der gymnasialen Oberstufe. Dabei werden durch mehrere qualitative und quantitative Forschungsmethoden empirische Daten gesammelt, aus denen die Effektivität der entwickelten Projektstunde in Bezug auf den Lernzuwachs abgeleitet werden kann und somit die Forschungsfrage beantwortet. Um eine höhere Aussagekraft zu erhalten und die Daten besser analysieren und vergleichen zu können, wurde die Projektstunde in drei verschiedenen Schulen, dem Kurt-Schwitters Gymnasium Misburg, der Ricarda-Huch-Schule Hannover und der Leibniz Schule Hannover in der 12. Jahrgangsstufe durchgeführt. Die Erhebung aller Daten erfolgt nach Genehmigung durch die zuständige Landesschulbehörde auf freiwilliger Basis und nur mit dem Einverständnis aller Beteiligten beziehungsweise der jeweiligen Erziehungsberechtigten.

Alle erhobenen Daten sind nicht personenbezogen und der eingesetzte Fragebogen wird von den Schüler\*innen anonym ausgefüllt. Die erhobenen Daten werden ausschließlich forschungsbezogen ausgewertet und dazu genutzt, die Qualität der durchgeführten Lerneinheit zu bewerten.

Vor der Unterrichtsstunde sollen die Lernvoraussetzungen und die Vorkenntnisse der Lerngruppe in Erfahrung gebracht werden. Durch Kenntnisse über die Voraussetzungen der teilnehmenden Schüler\*innen kann der Lerninhalt der Unterrichtsstunde bestmöglich angepasst werden. Ein großer Lernerfolg ist dann möglich, wenn an bekanntem oder bereits gelerntem Wissen angesetzt wird. Es soll vermieden werden, dass die Schüler\*innen sich durch den präsentierten Lernstoff überfordert fühlen und so die Motivation zum Lernen verlieren. Um entsprechende Informationen zu sammeln, wurden die für die Lerngruppen zuständigen Lehrkräfte ungefähr eine Woche vor der Durchführung der Projektstunde in einem Interview befragt. Die entsprechenden Transkripte befinden sich in ausführlicher Form im Anhang dieser Bachelorarbeit. Die Interviews wurden auf Grundlage eines

Interviewleitfadens durchgeführt, der in die Bereiche Lerngruppendynamik und Befragung zum Vorwissen in den relevanten Bereichen Mathematik, Physik, Informatik und quantenmechanische Grundlagen unterteilt ist. Ziel des Interviews ist es, situative und individuelle Lernvoraussetzungen der verschiedenen Lerngruppen ausfindig zu machen, auf denen die didaktische Analyse der Unterrichtsstunde basiert. In der Literatur über qualitative Forschungsmethoden wird dem Verfahren des Interviews als Form der Datenerzeugung im Forschungsprozess eine bedeutende Rolle zugeteilt. Das Interview eignet sich besonders zur Ermittlung von Zusammenhängen sozialer Realität, wie in diesem Fall einer Einschätzung der situativen und individuellen Voraussetzungen für die Unterrichtsstunde. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich um eine persönliche Einschätzung durch die entsprechende Lehrkraft handelt. Mit dieser empirischen Methode können keine Daten über die tatsächlichen Leistungs- und Kenntnisstände der Schüler\*innen erhoben werden.

Die Unterrichtsstunde lässt sich gliedern in eine lehrerzentrierte Einleitung, eine Arbeitsphase mit regelmäßigen Lernabfragen sowie eine abschließende Sicherungsphase mit einer inhaltlichen Zusammenfassung. Zudem wird ein Ausblick in die zukünftigen Möglichkeiten der Quanteninformationstechnik gegeben. Eingeleitet wurde in das Thema mit einer Power Point Präsentation, die Themen beinhaltet, wie zum Beispiel die Funktionsweise von herkömmlichen Computern sowie die Eigenschaften von Bits. Von den Aspekten der klassischen Informationsverarbeitung wird übergeleitet zu den Qubits und deren universellen Zuständen. Im Hauptteil der Unterrichtsstunde wurden an einem digitalen Arbeitsblatt in Form eines Jupyter Notebooks grundlegende Inhalte zur Quantenmechanik erarbeitet.

Über den folgenden Link kann das Notebook aufgerufen werden.

<https://colab.research.google.com/drive/12poaWHpCxIe8Nn4YM5q0RieSTHUm0LWP?usp=sharing> (Zur Bearbeitung ist grundsätzlich ein Google Account nötig. In der Unterrichtsstunde bekommen die Schüler\*innen individuelle Accounts zur Verfügung gestellt)

Zu den Inhalten des Jupyter Notebooks gehören der Vergleich von Bits und Qubits, klassische Gatter und Quantengatter, die Veränderung von Zuständen sowie der probabilistische Charakter der Quantenmechanik. Im Anschluss an die umfangreiche Arbeitsphase wurde im Plenum über die bearbeiteten Schwerpunkte gesprochen und abschließende Fragen beantwortet. Eine Lernüberprüfung und Sicherung erfolgte bereits im

Notebook in Form von Kurzfragen. Der detaillierte Ablauf der Unterrichtsstunde wird in den folgenden Kapiteln im Zuge der didaktischen Analyse genauer beschrieben und ausgewertet. Während der Unterrichtsstunde wurde eine nichtteilnehmende Beobachtung durchgeführt. Hier wurden Besonderheiten, Rückfragen, das Auftreten von Verständnisproblemen oder Auffälligkeiten in der Umsetzung notiert. Anhand dieser Beobachtungen kann die Unterrichtsstunde im Verlauf reflektiert werden.

Um die Effektivität der Unterrichtsstunde im Nachhinein bewerten und analysieren zu können, sind die Meinungen der teilnehmenden Schüler\*innen wichtig. In einer kurzen schriftlichen Befragung sollen daher Erkenntnisse über erworbenes Wissen generiert und die persönlichen Einschätzungen zur Unterrichtsstunde festgestellt werden.

So können genaue Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie quantenmechanische Grundlagen, in diesem Fall der Definition des Qubits und dessen probabilistischen Zuständen im quantenmechanischen System, erfolgsorientiert an Schüler\*innen einer gymnasialen Oberstufe gelehrt werden können. Zudem kann sich ein qualitativer Überblick über den Lernerfolg verschafft werden. Der Fragebogen wurde papierbasiert und in anonymisierter Form bearbeitet. Ausschließlich das Geschlecht und das belegte Leistungsniveau im Fach Physik wurde aus Forschungszwecken abgefragt. Gegliedert wurde der Fragebogen in die Bereiche: Persönliches, Befragung zum Vorwissen, Wissensfragen zu den vermittelten quantenmechanischen Grundlagen, eine eigene Beurteilung über den Lernerfolg sowie einem persönlichen Feedback zur Unterrichtsstunde. Diese Menge an gesammelten empirischen Daten aus Lehrer\*inneninterview, Unterrichtsbeobachtungen und Schüler\*innenbefragung werden in einer Triangulation mit dem Fokus auf der Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen aufeinander bezogen. In Form dreier Bachelorarbeiten mit verschiedenen Schwerpunkten im Hinblick auf die übergeordnete Forschungsfrage werden diese Daten ausgewertet und analysiert. Diese Bachelorarbeit macht die Analyse der didaktischen Überlegungen zur Stundenplanung sowie einer Reflexion der Unterrichtsdurchführung zum Thema. In einer zweiten Bachelorarbeit wird die hauptsächliche empirische Datenauswertung vorgenommen. Die dritte Arbeit beschäftigt sich mit der Implementierung der Grundlagen der Quantenmechanik mit Qiskit in Form eines Jupyter Notebooks.

### **3 Bedingungsanalyse**

Um einen größtmöglichen Lernerfolg zu erzielen, ist es entscheidend, die Umsetzung der Lerneinheit an die jeweilige Gruppe und die vorzufindenden Rahmenbedingungen anzupassen. Wird an dem Vorwissen der Schüler\*innen angesetzt, die Lehr- und Lernausgangslage beachtet sowie auf die Statistik der Lerngruppe eingegangen, kann der nachhaltige Wissenszuwachs bei allen teilnehmenden Schüler\*innen positiv beeinflusst werden. In diesem Zuge müssen die situativen und individuellen Voraussetzungen für die Unterrichtsstunde bei den drei teilnehmenden Lerngruppen betrachtet werden. Erst durch diese Analyse der Lernvoraussetzungen kann ein lernvoraussetzungsbezogenes unterrichtliches Angebot, einen sogenannten adaptiven Unterricht, konzipiert werden, das die Lernenden bestmöglich individuell fördern kann. Die Einschätzungen zu den drei Lerngruppen gehen vollständig aus den Lehrer\*inneninterviews hervor. Die entsprechenden Transkripte befinden sich im Anhang auf den Seiten 43-48. Da die Erkenntnisse aus dem Interview in den folgenden Unterkapiteln ausführlich ausgeführt werden, wird auf eine wiederholte Angabe der Quelle „Interview“ verzichtet.

#### **3.1 Situative Voraussetzungen**

Bei der Beschreibung der situativen Voraussetzungen, die häufig auch als sozial-kulturelle Voraussetzungen bezeichnet werden, betrachtet man die Schulklasse als soziales Gefüge mit speziellen Eigenschaften, die es gilt, qualitativ und quantitativ in Erfahrung zu bringen. Die Zusammensetzung der Schüler\*innen mit ihren individuellen Eigenschaften im Rahmen der Schule ist dabei hinreichend relevant für die Umsetzung von Lerneinheiten. Zu den situativen Voraussetzungen zählen die Lehr- und Lernausgangslage der Schüler\*innen, die Statistik der Lerngruppe und schulbedingte Rahmenbedingungen. Aus den Lehrer\*inneninterviews gehen für die drei Projektklassen verschiedene situative Lernvoraussetzungen und Rahmenbedingungen der Stunde hervor.

Bei dem Physikleistungskurs des Kurt-Schwitters Gymnasiums aus Misburg handelt es sich um eine sehr heterogene Lerngruppe, bestehend aus 23 Schüler\*innen, 3 davon weiblich und 20 männlich, eines allgemeinbildenden Gymnasiums. An der Projektstunde nahmen allerdings nur 17 Schüler\*innen teil, davon 2 Mädchen. Das Leistungsniveau der Lerngruppe befindet sich auf einem eher durchwachsenen Niveau mit großer Heterogenität. Nach Angaben der Lehrkraft gibt es neben drei bis vier leistungsstarken Schüler\*innen, die den



Unterricht mit qualitativ hochwertigen Beiträgen bereichern, auch einige Schüler\*innen im ungenügenden oder mangelhaften Notenbereich. Da sich nur wenige Lernende auf dreier Niveau befinden, zeichnet der Kurs eine große Schere in der Leistungsfähigkeit und damit auch den zu erwartenden Vorkenntnissen aus. Im Unterricht selbst verhält sich die Klasse respektvoll und freundlich, wodurch eine angenehme und lockere Atmosphäre herrscht. Die Lehrkraft versucht das Niveau im regulären Unterricht trotzdem anspruchsvoll zu halten, um den Anforderungen für das Zentralabitur gerecht zu werden und alle Schüler\*innen bestmöglich auf die Prüfungen vorzubereiten.

Zu den räumlichen und zeitlichen Bedingungen des Projektunterrichts lässt sich festhalten, dass die Stunde als Doppelstunde in der 3./4. Stunde am 21. Juni 2023 stattfand. Aufgrund von Problemen bei der Anmeldung auf Schultablets wurde der Unterricht in den Computerraum verlagert. Dort konnten sich die Schüler\*innen mit ihren eigenen Accounts an den Rechnern anmelden. Die Schule orientiert sich ganzheitlich an den Kriterien des Kerncurriculums. Im Fach Physik werden somit, besonders in der gymnasialen Oberstufe, keine eigenen Wahlpflichtthemen behandelt. Über die vier Halbjahre in der gymnasialen Oberstufe werden die abiturrelevanten Themen gelehrt, wobei Bereiche der Quantenphysik, wenn überhaupt nur als Vertiefung in anderen Themenbereichen angerissen werden. Dies ist bei allen drei Projektschulen äquivalent. In welcher Form und in welchem Umfang die Quantenmechanik generell im Kerncurriculum Erwähnung findet, wird in Kapitel 5.1 im Hinblick auf die Legitimation dieses Themas untersucht. Vorangegangener Themenschwerpunkt des Kurses im regulären Unterricht war die Interpretation und Durchführung des Doppelspaltversuchs sowie die Vertiefung mit Gitter. Dabei lernten die Schüler\*innen die Beschreibung und Deutung von Interferenzphänomenen. Im Zuge dieser Thematik fand allerdings noch keine Überleitung zum Themenbereich Quantenobjekte, der für die gymnasiale Oberstufe im Kerncurriculum festgelegt ist (Niedersächsisches Kultusministerium, 2017, S. 36 f) statt. Der Themenübergang erfolgt erst im 3. Halbjahr mit der Thematik gequantelter Energiewerte. Somit steht die Projektstunde ohne jegliche Einbettung in eine fortschreitende Unterrichtseinheit. Trotzdem wird versucht in der Doppelstunde an Bekanntem aus den letzten Stunden anzuknüpfen und besonders die Interferenzthematik mit einzubeziehen.

An der zweiten Projektschule, der Ricarda-Huch-Schule Hannover, handelt es sich ebenfalls um einen Physikleistungskurs, bestehend aus 3 Mädchen und 10 Jungen. An der Projektstunde nahmen 10 Schüler\*innen teil. Die Stunde wurde am 27. Juni 2023 in der 3./4.

Stunde durchgeführt. Da die Hälfte der Klasse bereits mit eigenen Tablets ausgestattet ist und weitere digitale Geräte ausgeliehen werden konnten, waren die technischen Bedingungen sehr gut, was das Arbeiten in kleineren Gruppen mit mehreren Geräten ermöglichte. Der Kurs wird von der Lehrkraft als leistungsstark eingeschätzt. Einige sehr leistungsstarke Schüler\*innen prägen den Unterricht. Insgesamt herrscht ein gutes Unterrichtsklima, was zu einer angenehmen Arbeitsatmosphäre beiträgt. Der Großteil der Lernenden ist begeisterungsfähig und arbeitet sehr selbstständig an naturwissenschaftlichen Themen. Die Lerngruppe arbeitet gerne in Gruppenarbeit und kommt in dieser Sozialform häufig zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen. Auch eine Präsentation von Einzel- und Gruppenergebnissen wird im regulären Unterricht öfters vorgenommen. Bei der Ergebnispräsentation müssen die Schüler\*innen teilweise durch Impulse in ein Unterrichtsgespräch mit Schüler\*inneninteraktion verwickelt werden. Hier sind die Referent\*innen aufgefordert, entsprechend zu reagieren. Die zuletzt behandelten Themen weichen stark von der Thematik der Projektstunde ab, weshalb kein Bezug zur aktuellen Unterrichtseinheit hergestellt wird. Die Einführungsweise bleibt analog zu den anderen Lerngruppen.

Der reine Leistungskurs der Leibniz Schule Hannover besteht aus 17 Schüler\*innen, 5 davon weiblich und 12 männlich. Aufgrund des großen Interesses an dem Thema nahmen auch Schüler\*innen außerhalb der regulären Lerngruppe am Projektunterricht teil, sodass 19 Teilnehmende zu verzeichnen waren. Die zuständige Lehrkraft schätzt den Kurs als relativ leistungshomogene Gruppe auf gutem Unterrichtsniveau ein. Die Schüler\*innen teilen sich gleichmäßig auf die Notenbereiche sehr gut, gut und befriedigend auf. Viele Kursteilnehmer\*innen belegen zusätzlich Chemie als Leistungskurs, was sich als hilfreiche Symbiose zum Physikunterricht darstellt. Die Stunde fand am 29. Juni 2023 in der 3./4. Stunde statt. Die Schüler\*innen benutzen Tablets für die Bearbeitung des Jupyter Notebooks, wobei jeder sein eigenes Gerät hatte. In der laufenden Unterrichtseinheit thematisiert der Kurs Schwingungen, Wellen und Interferenz. Es wurden bisher zwei Quellen betrachtet, die interferiert haben. Da dieses Thema bisher noch nicht ausführlich und tiefgründig behandelt wurde, ist es schwierig, mit der Thematik der Projektstunde an der Unterrichtseinheit des regulären Physikunterrichts anzuknüpfen.

Im Unterricht verhält sich die Lerngruppe respektvoll und freundlich, wodurch eine gute Arbeitsatmosphäre entsteht. Verfällt die Klasse mal in Unruhe, so lässt sie sich mit einfachen Ansagen schnell wieder beruhigen. Teilweise ist der Kurs etwas langsam beim

selbstständigen Bearbeiten von verschiedenen Aufgaben. Ein genauer Zeitplan und Hinweise zur zeitlichen Planung der Aufgabenbearbeitung sollen helfen, dieses Problem zu verbessern. Besonders in Gruppenarbeit werden qualitativ hochwertige Ergebnisse erzielt. Eine Gruppenarbeit in zufällig gemischten Gruppenkonstellationen stellt also keinerlei Probleme dar.

### **3.2 Individuelle Voraussetzungen**

In erster Linie sollte der Unterricht für die Schüler\*innen geplant werden und die individuellen Voraussetzungen der Lernenden eine der wichtigsten Planungsgrößen darstellen. Zu den individuellen Voraussetzungen gehören der bereichsspezifische Lern- und Entwicklungsstand (kognitive Lernvoraussetzungen), die Interessen, die Einstellungen und die Motivation (affektive Lernvoraussetzungen) sowie das Arbeits- und Lernverhalten.

Analysiert man die individuellen Voraussetzungen der Lerngruppe des Kurt-Schwitters Gymnasiums ist anzumerken, dass sich die Schüler\*innen teilweise wenig intrinsisch für neue Themen motivieren können. Einige Schüler\*innen interessieren sich zwar für technische, physikalische und naturwissenschaftliche Themen, trotzdem muss in der Unterrichtsstunde immer wieder darauf geachtet werden, durch klare Arbeitsaufträge alle Schüler\*innen zu aktivieren, besonders in der Gruppenarbeitsphase. Aktive Gruppendiskussionen müssen dann recht häufig durch die Referent\*innen angeregt und unterstützt werden. Die Lern- und Arbeitsatmosphäre ist zumeist entspannt. Einige Schüler\*innen lassen sich leicht ablenken und sorgen manchmal für Störungen des Unterrichts. Digitale Mediennutzung, beispielsweise mit Tablets oder Computern, begünstigen die Ablenkung. Gruppenarbeiten sind weitestgehend problemlos möglich und die Lernenden sind in der Lage, Aufgaben eigenständig zu lösen. Trotzdem ist im Nachhinein dazu zu raten, kleine Gruppen von weniger als vier Schüler\*innen zu bilden und darauf zu achten, dass die Gruppen von der Lehrkraft heterogen zusammengestellt werden. So kann die Lernwirksamkeit bei allen Lernenden gesteigert werden. Mit 9 von 17 teilnehmenden Schüler\*innen belegt ungefähr die Hälfte des Kurses Informatik als Fach in der gymnasialen Oberstufe und haben damit Vorwissen und ein gewisses Interesse an technischen Themen. Auf welchen Kenntnissen dort aufgebaut oder angeknüpft werden kann, ist allerdings nicht bekannt.

In der Ricarda-Huch-Schule interessieren sich einige Schüler\*innen für technische und physikalische Themen, was sich durch außerunterrichtliches Engagement abzeichnet. Aus diesem Grund kann hier von vielfältigen Vorkenntnissen und einer großen intrinsischen Motivation bei einem Großteil der Klasse ausgegangen werden, obwohl nur zwei Schüler\*innen das Fach Informatik belegen. Die Sozialform der Gruppenarbeit als Hauptbestandteil unserer Projektstunde ist in dieser Lerngruppe auch mit zufälliger Gruppenzuweisung problemlos möglich. Es entstehen qualitativ hochwertige Gruppendiskussionen über den Lernstoff. Da trotzdem Leistungsunterschiede unter den Schüler\*innen vorhanden sind, muss eine Binnendifferenzierung nach oben und unten geplant werden. Dies gilt auch für die anderen beiden Lerngruppen.

Die Lerngruppe der Leibniz Schule besteht aus vielen Schüler\*innen, die sich für verschiedenste naturwissenschaftliche Themen begeistern lassen. Ein interessanter realitätsnaher Einstieg ist deshalb enorm wichtig, um von Beginn an Begeisterung für das Thema zu wecken. Die meisten Schüler\*innen beteiligen sich aktiv am Unterricht, was Diskussionen im Plenum bereichert.

### **3.3 Einschätzung zum Vorwissen**

Neben den individuellen und situativen Voraussetzungen spielen auch das themenspezifische Vorwissen und der inhaltliche Kenntnisstand der Lerngruppe eine wichtige Rolle. Ist der Unterricht an den Kenntnisstand angepasst und setzt an bereits bekanntem Wissen an, kann die Lernwirksamkeit nachweislich gesteigert werden (Duit & Wodzinski, 2010, S.10). Da für die Bearbeitung des Lerninhalts der Projektstunde auch mathematische und physikalische Themen mit einfließen, werden neben der Quantenmechanik auch die Vorkenntnisse in diesen Bereichen betrachtet.

Bei der Lerngruppe des Kurt-Schwitters Gymnasiums sind die mathematischen Grundlagen auf basalem Niveau weitestgehend bei allen Schüler\*innen vorhanden. Grundsätzlich haben viele Schüler\*innen aber mit komplexen mathematischen Anwendungen oder Themen Probleme. Die Vektorschreibweise wurde bereits im Matheunterricht behandelt, sodass die Grundlagen und die allgemeine Darstellungsform, besonders von zweidimensionalen Vektoren allen Schüler\*innen bekannt sein sollte. Das kann im Einstig bei der Darstellung von Zuständen durch Vektoren sinnvoll eingesetzt werden. Im Physikunterricht wurden Probleme bereits durch Kraftpfeile oder die Zeigerdarstellung visualisiert und gelöst. Das eigenständige Anwenden und Transformieren in diese Darstellungsform stellt die meisten

Schüler\*innen, laut der Lehrkraft, allerdings vor größere Probleme, was bei der Erklärung und der Arbeit mit der Blochkugel beachtet werden muss. Die Angabe und die Interpretation von Wahrscheinlichkeiten, sollte bei dem Großteil der Schüler\*innen auf grundlegendem Niveau möglich sein. Vertiefende Themen im Bereich der Stochastik wird erst im Mathematikunterricht des dritten Halbjahres in der gymnasialen Oberstufe behandelt, weshalb der Rückgriff auf Wahrscheinlichkeitsthemen eher grundlegend erfolgen sollte. Im physikalischen Bereich ist anzumerken, dass besonders Themen wie Atomvorstellungen und das Schalenmodell nur aus der Chemie bekannt sind. Energieniveaus kommen in Physik erst später dran. Aus diesem Grund haben wir uns aufgrund mangelnder Vorkenntnisse gegen eine Einführung von Zuständen über das Schalenmodell und den Energieniveaus entschieden. Quantenmechanische Grundlagen sind aus dem Schulunterricht nicht vorhanden. Bits, Zustände und Programmiersprachen werden, wenn überhaupt nur im Fach Informatik angeschnitten oder sind ausschließlich aus außerschulischem Interesse gegeben. Hier kann also nicht auf Vorwissen aufgebaut werden. Gerade für den Einstieg der Projektstunde fordert das zu einer sehr grundlegenden und möglichst anschaulichen Herangehensweise, beispielsweise durch Analogien, auf. Unterschiedliche Lernzugänge können helfen, alle Schüler\*innen bei dem Lernzuwachs zu unterstützen.

In der Lerngruppe der Ricarda-Huch-Schule herrscht ein reges Interesse an mathematischen Themen und Umsetzungen, was sich zumeist durch Nachfragen ausdrückt. Die Lehrkraft beschreibt die mathematischen Fähigkeiten der Lerngruppe als gut. Das ermöglicht die mathematische Darstellung von quantenmechanischen Grundlagen in der Vermittlung. Die Lerngruppe hat das Konzept von Vektoren und Vektordarstellung hinreichend verinnerlicht, sodass sie physikalische Probleme mit Vektoren mathematisch bis zu zwei Dimensionen darstellen können. Auch die Zeigerdarstellung wurde im Physikunterricht schon häufig verwendet. Das deutet darauf hin, dass vermutlich die Vermittlungsmethode und der Lernzugang über die Darstellung auf der Blochkugel bei einem Großteil der Lernenden den größten Lernzuwachs hervorruft und zu wenig Verständnisproblemen führt. Der Einheitskreis ist den Schüler\*innen nicht bekannt, weshalb auf die Einführung über die fachliche Bedeutung des Einheitskreises bei der Darstellung von Bits abgesehen wird. Die Darstellung auf einem Kreis wird ohne fachlichen Bezug zum Einheitskreis aufgegriffen. Physikalisch betrachtet fehlt auch hier das Vorwissen zum Schalenmodell und den Energieniveaus, wobei Quanten mit der entsprechenden Energieformel für Photonen  $E = h \cdot f$  bereits bekannt sind. Die Schüler\*innen wissen, dass es kleinste Energieportionen gibt. Auch

Phänomene zum Doppelspaltversuch wurden ausführlich behandelt. Zusätzlich wurde bereits der Welle-Teilchen-Dualismus und die Grundlagen von Verschränkung im Physikunterricht behandelt. Dies sind bereits vielseitige Vorkenntnisse, die in Zusammenhang mit dem zu behandelnden Thema gebracht werden können. Aufgrund dieser Vorkenntnisse ist es wichtig, immer wieder Rückbezüge zu bekannten Inhalten anzubieten und den Schüler\*innen das Verknüpfen mit dem neuen Wissen zu ermöglichen. Es muss allerdings darauf geachtet werden, nicht zu viel vorauszusetzen, damit alle Schüler\*innen auch mit Lücken im Vorwissen dem Lerninhalt der Projektstunde folgen können. Aufgrund der vielseitigen Vorkenntnisse ist zudem mit tiefgründigen und vernetzenden Nachfragen seitens der Lernenden zu rechnen, worauf die Referent\*innen vorbereitet sein müssen.

Der Physikkurs der Leibniz Schule verfügt flächendeckend über gute Vorkenntnisse in den verschiedenen Bereichen. Vektordarstellungen und Vektorrechnungen beherrscht ein Großteil der Schüler\*innen sicher. In der Angabe und Anwendung von Wahrscheinlichkeiten treten nur selten Schwierigkeiten auf. Der Atomvorstellung betreffend ist das Rutherford'sche Atommodell der aktuelle Stand der thematisch behandelt wurde. Hier wurde auch in Bezug auf das Schalenmodell viel im Chemieunterricht thematisiert. Durch die Coronapandemie besitzen die Schüler\*innen über gequantelte Energiewerte eher wenig Vorwissen. Bei allen drei Lerngruppen muss bedacht werden, dass Themen durch die Coronapandemie im Homeschooling behandelt wurden und somit die im Kerncurriculum festgehaltenen Kompetenzen nicht zwingend bei allen Schüler\*innen erworben wurden. Eine Binnendifferenzierung muss zwingend vorgenommen werden, um an den verschiedenen Kenntnisständen anzusetzen. Der Physikunterricht war bis zu dem Zeitpunkt der Projektstunde unberührt von Grundlagen der Quantenmechanik, weshalb kein Vorwissen vorausgesetzt werden kann.

Auf Basis dieser Betrachtung, lässt sich festhalten, dass vor allem die direkten thematischen Zusammenhänge im Bereich der Quantenphysik komplett fehlen und auf sehr grundlegendem Niveau mit der Vermittlung begonnen werden muss. Einzig bei den Darstellungsformen durch Pfeile oder mathematische Möglichkeiten kann auf grundlegende Vorkenntnisse aufgebaut werden.

## **4 Sachanalyse**

Die Sachanalyse ist im fachwissenschaftlichen Schwerpunkt zu verorten und zielt auf die Frage ab, was im Unterricht thematisiert wurde. Unter Rückgriff fachwissenschaftlicher Literatur wird hier der wissenschaftliche Kenntnisstand des gewählten Themas kurz

dargestellt. Die Darstellung bezieht sich auf den größeren Sachzusammenhang, die zentralen thematischen Elemente und Begrifflichkeiten sowie die Unterscheidung von Bedeutungsschichten, das heißt, die Verbindung einzelner Inhaltselemente, wie sie sich aus unterschiedlichen Perspektiven zeigen. Da die fachwissenschaftlichen Inhalte zum Teil hochgradig komplex sind, wird diese Sachanalyse in Verbindung mit den Zielen des Unterrichtes und konkreten Fragestellungen der Inhalte im Unterricht gedacht. Ausführlichere Darstellungen des fachwissenschaftlichen Kontextes speziell über die Inhalte des entwickelten Jupyter Notebooks werden in der Bachelorarbeit von Ole Grimsel mit dem Titel „Quantenmechanische Grundlagen und Qiskit für Quantencomputing“ ausgeführt. Zuerst sollten die wichtigen Elemente der klassischen Informationsverarbeitung kurz angesprochen werden, um die Unterschiede zur Quanteninformationsverarbeitung zu illustrieren.

Ein 2-Niveau System mit einer charakteristischen Eigenschaft die nur zwei mögliche Werte - 0 oder 1 – annehmen kann, ist das einfachste klassische System. Man spricht dabei auch von einem Bit (engl. binary digit). Ein Bit ist im Computerumfeld die kleinste verwendete Informationseinheit und sollte als abstraktes Objekt verstanden werden. Um Informationen verarbeiten zu können bedarf es Systeme, die aus mehreren Bits bestehen, den sogenannten Bitstrings. Dabei handelt es sich um eine Ansammlung von elementaren 2-Niveau Systemen, wobei jedes Bit wieder nur 2 möglich Werte annehmen kann. Ein System mit  $n$  Bits hat also insgesamt  $2^n$  verschiedene Einstellungsmöglichkeiten (Dür, 2010, S.2f.).

Die klassische Informationsverarbeitung wird nun durch die Manipulation eines Bitstrings durch logische Gatter realisiert. Diese bilden ein Bitstring nach einer einfachen Abbildungsvorschrift auf ein anderes ab. Elementare logische Gatter sind zum Beispiel das NOT Gatter, das AND Gatter sowie das OR Gatter. Jede Berechnung am Computer wird nach diesem Schema ausgeführt (Dür, 2010, S.2).

Die Informationsverarbeitung bei Quantencomputern funktioniert ähnlich. Dazu werden zunächst die quantenmechanische Beschreibung von Zuständen, Messungen und Operatoren, sowie die daraus resultierenden Eigenschaften betrachtet.

Analog zum klassischen Bit ist ein Qubit (Quantenbit) das einfachste quantenmechanische System. Es handelt sich wieder um ein 2-Niveau System, wobei eine charakteristische Eigenschaft wieder zweimögliche Werte annehmen kann. Die werden nun in der Dirac-Schreibweise mit  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  beschrieben. Bei der charakteristischen Eigenschaft kann es sich zum Beispiel um den Ort des Teilchens, den Spin eines Elektrons, die Polarisation eines Photons oder um zwei interne Atomzustände handeln. Die Begriffe Zustand und

quantenmechanische Systeme sind hier von zentraler fachwissenschaftlicher Bedeutung (Dür, 2010, S.3f).

Im Vergleich zur klassischen Betrachtung ist nun neu, dass auch beliebige Überlagerungen der beiden Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ , als sogenannte Superposition, möglich sind. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Quantenzustände immer normiert sein müssen und die Phase irrelevant für das physikalische Verhalten ist, so ist der Zustand eines Qubits durch zwei reelle Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  charakterisiert. Ein solcher Zustand kann mathematisch wie folgt dargestellt werden.

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

Visuell kann der Quantenzustand eines Qubits durch einen Vektor der Länge 1 auf einer sogenannten Blochkugel dargestellt werden. In dieser Darstellungsform ist der Zustand  $|0\rangle$  in  $+z$ -Richtung, während  $|1\rangle$  in  $-z$ -Richtung orientiert ist. Der Überlagerungszustand  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$  entspricht dabei einem Vektor in  $+x$ -Richtung. Bei der Einführung von Qubits in der Schule können, aufgrund der mathematischen Voraussetzungen nur reelle Koeffizienten, betrachtet werden (Phase  $e^{i\varphi} = 1$ ). Durch diese mathematische Vereinfachung kann das Bild der Blochkugel zu einem Einheitskreis reduziert werden (Dür, 2010, S.3).

Es können auch komplexere Quantensysteme aus mehreren zusammengesetzten Qubits beschrieben werden. Ein System aus zwei Qubits hat dabei vier Basiszustände, wobei aber auch wieder beliebig viele Überlagerungen möglich sind. Beschrieben wird ein 2-Qubit System durch einen Vektor mit vier Komponenten. Besonders interessant sind dabei die verschränkten Zustände. Dabei ist das Gesamtsystem zwar in einem definierten Zustand, aber nicht die einzelnen Qubits. Messungen der einzelnen Qubits ergeben zufällige Ergebnisse. Findet die Messung der beiden Qubits unabhängig voneinander statt, sind die Ergebnisse zwar zufällig, aber in beiden Fällen immer perfekt korrekt. Ein Beispiel für einen verschränkten Zustand ist der Bell Zustand.

$$|\varphi\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$$

Der Zustand eines Qubits kann ebenfalls manipuliert werden. Die Änderung des Zustands entspricht dabei der Drehung des Zustandsvektors auf der Oberfläche der Blochkugel. Beschrieben wird die Zustandsänderung durch unitäre Operationen. Dabei wird der Zustandsvektor mit einer  $2 \times 2$  Matrix multipliziert. Diese unitären Abbildungsvorschriften sind analog zur klassischen Mechanik als Quantengatter zu verstehen. Bekannte Quantengatter sind das X-Gatter, CNOT Gatter und das Hadamard-Gatter (Dür, 2010, S.4).



Neu im Vergleich zur klassischen Physik ist auch das Verhalten des Quantensystems bei Messungen. Gemessen werden kann nur in z-Richtung. Das heißt, es kann nur zwischen zwei Ergebnissen unterschieden werden -  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ . Befindet sich das Quantensystem zum Zeitpunkt der Messung in einem Überlagerungszustand, so erhält man ein zufälliges nicht vorhersagbares Ergebnis in Form von Wahrscheinlichkeiten. Die Kenntnis des Zustands des Systems erlaubt dabei keine Vorhersage für ein Einzelereignis. Führt man allerdings viele Wiederholungen derselben Messung durch, so kann das stochastische Verhalten berechnet werden. Nach der Messung ist der Überlagerungszustand nicht mehr vorhanden und der Zustandsvektor zeigt in die Richtung des Messvektors.

Anhand der Betrachtung können die drei zentralen Eigenschaften der Quantenmechanik kennengelernt und durch das einfache Bild der Blochkugel dargestellt werden. Zu den zentralen Eigenschaften zählen die Möglichkeit von Überlagerungen, das zufällige Verhalten bei Messungen sowie die Änderung des Zustands durch die Messung. Viele dieser Eigenschaften stehen im direkten Widerspruch zu uns vertrauten und als selbstverständlich betrachteten Eigenschaften von klassischen Systemen (Dür, 2010, S.4ff). Diese differenziellen Eigenschaften von Quantensystemen sind aus Sicht der Quanteninformationstheorie zur Anwendung für eine verbesserte Informationsverarbeitung von besonderem Interesse. Als Informationsträger dienen einzelne Atom, Elektronen oder Photonen, welche individuell manipuliert werden können. Es konnte erforscht werden, dass solche Quantencomputer Probleme effizienter lösen können als klassische Computer.

## **5 Didaktische Überlegungen**

Im Kern zielt die fachdidaktische Analyse auf die begründete Auswahl und Strukturierung von Inhalten ab, also eine Begründung der wichtigsten Entscheidungen des geplanten Unterrichts. Es stellt sich die übergreifende Frage, wie die Lernenden durch die Auswahl von Inhalten und die Anordnung von inhaltlichen Elementen bei der Lernzielerreichung bestmöglich unterstützt werden können. Aus diesem Grund muss geprüft werden, ob die Beschäftigung mit den gewählten Inhalten einen besonderen Beitrag zur Erreichung der geplanten Lernziele bietet. Als Unterstützung für diese Prüfung dienen didaktische Ansätze, durch die Gründe für die Wahl und Strukturierung des Themas gefunden werden können. Auch für unser Projekt ist diese Betrachtung enorm wichtig. Kann der Lernerfolg auf eine gute und überlegte didaktische Umsetzung des komplexen wissenschaftlichen Themas im Schulkontext zurückgeführt werden, kann das hilfreiche Handlungsempfehlungen für eine zukünftig flächendeckendere Umsetzung dieses Themas in der Schule oder in der

Arbeitswelt liefern. Bei dieser Beurteilung ist auch das Feedback der Schüler\*innen aus der Befragung einzubeziehen, wie in Kapitel 9 ausgeführt wird.

Eine didaktische Analyse lässt sich immer in drei Bereiche aufteilen. Bei der Legitimation soll die Bedeutung und Funktion des Themas auf Basis von Rahmenplänen, Bildungsstandards und fachdidaktischen Ansätzen und eine Bedingungsanalyse unter anderem zu Lernprozessen und zum Kenntnisstand der Schüler\*innen dargestellt werden. Die Didaktische Reduktion ist eine zentrale Aufgabe von didaktischen Betrachtungen. Die komplexen Sachverhalte aus der Sachanalyse müssen, auch im Hinblick auf die Bedingungsanalyse, auf ihre wesentlichen Elemente zurückgeführt werden, um sie für Lernende überschaubar und begreifbar zu machen. Abschließend müssen diese Inhalte didaktisch sinnvoll strukturiert werden. Dazu zählen die begründete Abfolge der Inhalte und phasenweise Strukturierung der Unterrichtsstunde sowie Überlegungen zu Problemfragen und erkenntnisleitenden Fragestellungen.

## **5.1 Legitimation**

Um die Auswahl des ausgewählten Themenkomplexes legitimieren zu können, bedarf es einer Betrachtung der Bedeutung und Funktion des Themas aus unterschiedlichen Gesichtspunkten.

Wirft man einen Blick in das Kerncurriculum der gymnasialen Oberstufe des Fachs Physik, in dem ein didaktisch fundiertes Lehrprogramm mit Lehrzielen und zu erwerbenden Kompetenzen als Handreichung für Lehrkräfte verschriftlicht ist, muss man feststellen, dass die Grundlagen der Quantenmechanik mit Elementen der Quanteninformationstheorie hier nicht direkt als verpflichtendes Unterrichtselement vorgesehen sind. Allerdings wird an anderen Stellen beispielsweise im Bildungsbeitrag, bei den zu erwerbenden Kompetenzen oder verwandten Inhalten die Bedeutung des Themas für die Schule deutlich.

Durch die Auseinandersetzung mit Aspekten der Quantenphysik sowie der Atomphysik erarbeiten sich die Lernenden Kenntnisse mit direktem Anschluss an die moderne Forschung und lernen in einem aktuellen Gebiet das Wechselspiel zwischen Modellvorstellung, Theorie und Anwendung kennen. Sie erfahren dabei zudem, dass es Wissensgebiete gibt, die man sich gedanklich erschließen kann, die aber der unmittelbaren Beobachtung prinzipiell unzugänglich bleiben (Niedersächsisches Kultusministerium, 2017, S.6).

Einige festgehaltene inhaltsbezogene Kompetenzen stehen ebenfalls in Verbindung mit den Grundlagen der Quantenmechanik. Für die Qualifikationsphase ist der Themenbereich Quantenobjekte angedacht. In diesem Zuge wird inhaltsbezogen Experimente zur

Elektronenbeugungsröhre und dem Doppelspalt durchgenommen und daraus physikalische Schlüsse gezogen. Auch der Aufbau eines Mach-Zehnder Interferometers ist als thematischer Schwerpunkt angedacht. Des Weiteren soll die Planck'sche Konstante, der photoelektrische Effekt sowie die Heisenbergsche Unschärferelation behandelt werden. All diese Themen stehen in engem Zusammenhang mit den Grundlagen der Quantenmechanik, weshalb eine Kopplung an eines dieser Lerninhalte denkbar wäre.

Da es sich um ein Thema mit Bezug zur aktuellen Forschung handelt, können durch die geplante Projektstunde auch einige der prozessbezogenen Kompetenzen für die Oberstufe erworben werden. Die Schüler\*innen wenden ihre Kenntnisse auf die Deutung von Experimenten mit Quantenobjekten an. Sie setzen die Begriffe Komplementarität und Nichtlokalität mit dem neuen Wissen in Beziehung. Die Verwendung der Zeigerdarstellung als Visualisierungsmethode wird inhaltsübergreifend geschult (Niedersächsisches Kultusministerium, 2017, S.38f).

Auch in den Bildungsstandards für das Fach Physik findet die Quantenphysik wenig Beachtung. In der Fassung aus dem Jahr 2020 der Kultusministerkonferenz, ist für den Inhaltsbereich Quantenphysik ausschließlich der Thematisierung der stochastischen Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Eigenschaften von Quantenobjekten und die qualitative Betrachtung eines quantenmechanischen Atommodells vorgesehen (Sekretariat der ständigen Konferenz der Kultusminister, 2020). All diese Themen fallen nicht in den Inhaltsbereich der geplanten Projektstunde, sind aber eng damit verknüpft. Durch das Erlernen der Inhalte Qubits und stochastische Zustände, können viele Theorien und Konzepte der angedachten Themen bereits verstanden werden, was in späteren Unterrichtseinheiten den Transfer und den Lernprozess erleichtert.

Die Thematisierung quantenmechanischer Grundlagen für das Quantencomputing ist geeignet grundlegende Begriffe, Gesetze und Funktionsweisen aktueller technischer Anwendungen und zukünftiger digitaler Geräte erarbeiten zu können. Zudem weist er daraufhin, dass naturwissenschaftliche Erkenntnisse technisch verwertbar sind und dass technologischer Fortschritt die Naturwissenschaft vor neue Erkenntnisprobleme stellen kann. Es wird demonstrativ gezeigt, wie heute naturwissenschaftliche Forschung und technische Entwicklung vollzogen oder beeinflusst werden können. Eine Vermittlung vom Begreifen der natürlichen, aber auch technischen Umwelt, bildet besonders im heutigen Zeitalter eine wichtige Grundlage (Häußler, Bündler, Duit, Gräber & Mayer, 1998, S.4).

Das Thema hat große Auswirkungen auf den wissenschaftlichen Fortschritt und auf die Gesellschaft. Die Theorie der Quantenphysik hat eine universelle Bedeutung für das Verständnis der Welt. Erst die Gesetzmäßigkeiten der Quantentheorie lassen uns in vollem Umfang nachvollziehen, warum Materie stabil ist. Zudem überlappen die Aspekte der Quantenphysik stark mit den verschiedensten Wissenschaftsgebieten, wie zum Beispiel den Nanowissenschaften, Chemie, Medizin, Kern- und Teilchenphysik, Plasmaphysik und Informatik, um nur einige zu nennen. Nach Lüth geht die Bedeutung der Quantenmechanik für die Wissenschaft mit ihrem großen Einfluss auf die Alltagswelt einher. Viele Geräte oder Techniken wären ohne die Quantenphysik nicht vorhanden. Dazu zählt unter anderem auch das Smartphone, was besonders in der Lebenswelt der Schüler\*innen kaum mehr wegzudenken ist. Auch die Arbeitswelt und Wirtschaft bleibt von der Entwicklung der Quantenphysik durch zukünftige und neuartige digitale Techniken nicht unberührt. Das gesamte Informationszeitalter basiert auf integrierten Transistoren und wird nur durch das Verständnis über die Struktur von Halbleitern ermöglicht. Allein diese gesellschaftliche und wissenschaftliche Bedeutung verdeutlicht die Wichtigkeit einer geeigneten Transformation in den Schulkontext und zeugen für einen nachhaltigen Kompetenzzuwachs beim Erlernen der quantenmechanischen Grundlagen (Lüth, 2009, S. 3ff). Nach eingehender Betrachtung der Wichtigkeit des Themas für die Schule lässt sich, trotz der geringen Beachtung in deutschen Lehrplänen, ein überaus großer Bildungswert belegen, der die Thematik der Projektstunde legitimiert.

## **5.2 Didaktische Reduktion**

Bei der didaktischen Reduktion geht es darum, die komplexen Sachverhalte der zu behandelnden Themen auf ihre wesentlichen Elemente zurückzuführen, um sie für Lernende überschaubar und begreifbar zu machen. Die fachlichen Inhalte werden durch Verringerung, Verkürzung und Vereinfachung zu einem Lerngegenstand transformiert. Gerade bei den beschränkten Vorkenntnissen der Lerngruppen muss zunächst das fachliche Anspruchsniveau des forschungsbezogenen Themas abgesenkt werden. Nur so kann eine Anpassung an das Aufnahmevermögen und die geistige Leistungsfähigkeit der Lernenden erreicht werden.

Zum einen wird der Umfang der Lerninhalte durch reduktive Überlegungen bei der Unterrichtsplanung verringert und zum anderen werden die fundamentalen Aspekte der Sache unter Berücksichtigung der Bedingungsanalyse herausgestellt. In dem Fall der Projektstunde wurde sich aus diesem Grund auf wenige zentrale Grundlagen beschränkt. Es

wurde sich zum Beispiel nur auf die zentralen Gatter mit wenigen Ein- und Ausgangsqubits beschränkt. Dadurch konnten komplexe mathematische Formulierungen und Verständnisprobleme bei der Zustandsänderung reduziert werden.

Besonders bei der Formulierung von Formeln und Gleichungen zur Beschreibung von Zuständen werden, aus Gründen der Elementarisierung und Reduktion des komplexen Sachinhalts, bewusst Einflussfaktoren vernachlässigt. Hierzu zählen beispielsweise mathematisch komplizierte Vorfaktoren. Sie beeinflussen den untersuchten Inhalt nicht wesentlich, sodass sie in der Zustandsdarstellung weggelassen oder als Variable dargestellt werden können. So kann auch eine Einführung von imaginären Zahlen umgangen werden, was sich aufgrund mangelnder mathematischer Grundlagen als problematisch erweisen würde. Im gesamten Unterrichtsverlauf werden imaginäre Zahlen bewusst ausgespart und aus der Sachstruktur reduziert.

Auch das Superpositionsprinzip wird nur grundlegend angesprochen. Es beschreibt die Fähigkeit der Qubits sich bei einer Überlagerung gleichzeitig in mehreren Zuständen zu befinden. Erst eine Messung ändert diese Situation. Da die dahinterstehende Theorie schwer zu verstehen ist, wird hier die Begrifflichkeit nur oberflächlich behandelt. Allgemein werden Überlagerungen nur von maximal 2 Qubits betrachtet, um die Schüler\*innen nicht zu überfordern.

Technische Systeme der Lebenswelt und der aktuellen Forschung grenzen sich durch ihre Komplexität und durch ihre spezifische Zweckmäßigkeit von den physikalischen Systemen der Schulphysik ab. Fragen wie, wie funktioniert ein Computer oder Handy oder warum können Quantencomputer schneller Lösungen für komplexe Probleme finden, können nicht tiefgründig und komplex im Kontext des Physikunterrichts beantwortet werden. Dazu müssten alle verschiedenen Funktionseinheiten der technischen Geräte einzeln und im Zusammenwirken genau betrachtet werden. Dies würde im Schulkontext völlig den Rahmen sprengen. Aus diesem Grund wird sich auch in der Projektstunde nur auf die relevanten Funktionseinheiten fokussiert und auf allgemeine Gesetzmäßigkeiten und Theorien beschränkt. Bei der Vermittlung der Funktionsweise von Computern oder Quantencomputern wird beispielsweise nur auf die symbolische und oberflächliche Beschreibung der Kommunikation über Bits beziehungsweise Qubits eingegangen. Details der Arbeitsweise der jeweiligen Software werden nicht angesprochen und die Kommunikation zwischen den einzelnen Funktionseinheiten wird nur auf die Weitergabe von Bitkombinationen bezogen. Wie diese Bitkombinationen in Ausführungsanweisungen transformiert und dekodiert werden, wird ebenfalls nicht thematisiert. Die Beantwortung der

gestellten Fragen wird also auch im Hinblick auf die Bedingungsanalyse auf eine grobe Zusammenfassung heruntergebrochen. Irrelevante Eigenschaften werden ausgespart, damit sie die Schüler\*innen nicht verwirren.

Bei dem Lernprozess der quantenmechanischen Grundlagen, wie den Zuständen von Bits und Qubits und deren Veränderung, wird oft auf die Vereinfachung durch bildliche, symbolische oder mathematische Darstellungsformen zurückgegriffen. So können die Inhalte auf einfache schematische Lernmodelle didaktisch reduziert werden. Bilder können physikalisch komplexe Sachverhalte anders darstellen als Sprache oder mathematische Formulierungen und sie veranschaulichen gegenständliche sowie strukturelle Zusammenhänge.

Bei der Einführung von Bits und Qubits wird vermehrt auf die Pfeildarstellung von Zuständen zurückgegriffen. Dabei werden die Zustände als Pfeile auf der Oberfläche eines Kreises bei Bits beziehungsweise einer Kugel bei Qubits dargestellt. Der Ursprung befindet sich im Zentrum und die Pfeilspitze auf der jeweiligen Oberfläche. Die Beschreibung dieses Kreises als Einheitskreis wird ausgespart, da sich alle Lerngruppen im Mathematikunterricht noch nicht mit den Lerninhalten zum Einheitskreis beschäftigt oder diesen im physikalischen Kontext angewandt haben. Im Zusammenhang der Quantenmechanik wird das Auftragen von Qubitzuständen auf einer Kugel als Blochkugel bezeichnet. Die Begrifflichkeit wird den Schüler\*innen ebenfalls vermittelt, um den fachwissenschaftlichen Bezug zur Sachstruktur herzustellen. Die Darstellungsform mit Pfeilen ist angelehnt an die Charakterisierung vektorieller Größen durch einen Pfeil und die Zeigerdarstellung bei verschiedenen physikalischen Themen wie zum Beispiel die Visualisierung und Beschreibung von Wellen. Alle Lerngruppen sind in Grundzügen bereits mit dieser Darstellungsform vertraut (siehe Kapitel 3.3). Auch bei den aufbauenden Themenblöcken wird immer wieder auf diese Abbildungsform zurückgegriffen, um so durchgängig im Lernprozess einen visuellen Zugang anzubieten.

Außerdem werden spezielle Zeichen als Vereinfachung durch symbolische Darstellungen, insbesondere in der theoretischen Physik eingeführt, um physikalische Gesetze und Herleitungen vereinfacht darstellen zu können (Kircher & Girwidz, 2020a, S.168). In unserem Fall handelt es sich um die von Dirac eingeführte „Bracket-Schreibweise, durch die Gleichungen der Quantentheorie kürzer und übersichtlicher formuliert werden können. Die Darstellung von Zuständen ist mit dieser Darstellungsform mit wenig mathematischen

Vorkenntnissen zu verstehen. Die Schüler\*innen müssen dafür nicht schon mit der „Bracket“-Schreibweise vertraut sein. Ein kurzer Infotext über die wichtigsten Aspekte der Schreibweise und sehr basales mathematisches Formelverständnis reichen dafür aus, dass die Schüler\*innen die Zustände über diesen eher mathematisch angelegten Zugang verstehen und ausdrücken können. Eine weitere positive Eigenschaft der Darstellung von Zuständen mit dieser mathematischen Schreibweise ist, dass sie physikalische Sachverhalte maximal informativ bei einem Minimum an verwendeten Zeichen und Symbolen beschreibt, was den Lernprozess ebenfalls vereinfacht (Kircher & Girwidz, 2020a, S.168). Als logische Bilder dienen die Histogramme dazu, die Wahrscheinlichkeiten der Messergebnisse zu veranschaulichen und die relativen Größen miteinander zu vergleichen. Die Wahrscheinlichkeiten der Messergebnisse werden sofort deutlich und können anhand der Höhe der Histogrammbalken abgelesen und zugeordnet werden. Dies ist den Schüler\*innen bereits hinreichend aus dem Mathematikunterricht bekannt, was den Lernprozess unterstützt.

Als weitere Elementarisierung und Vereinfachung des Lerngegenstandes wurde in der Einführung von Bits und Qubits bewusst auf eine Analogie zu Lichtschaltern und Dimmern zurückgegriffen. Durch die Betrachtung von vertrauten Gegenstandsbereichen wird eine zugänglichere Veranschaulichung des Sachverhalts ermöglicht. In dem lehrer\*innenzentrierten Einstieg wurde eine Analogie zwischen Bits und Lichtschaltern und zwischen Qubits und Lichtdimmern hergestellt, um die Charaktereigenschaften der Bits beziehungsweise Qubits zu vermitteln. Analogien sind Übertragungen einzelner Aspekte bekannter Gegenstände oder Modelle auf neue Inhalte. Sie dienen als Erklärungshilfe bei unbekanntem physikalischen Sachverhalten und können als konstruktivistischer Anschluss an das Vorwissen verstanden werden. Die entscheidende fachdidaktische Funktion von Analogien als Lernhilfe im Unterricht ist neben einer Erklärungshilfe bei unbekanntem physikalischen Sachverhalten, die Förderung einer Wandlung von Alltagsvorstellungen in physikalische Vorstellungen (Duit Glynn, 1995, S.4 und Kircher, 1995, S.176). Beachtet werden muss, dass der Zielbereich von den Schüler\*innen als schwierig wahrgenommen wird, sodass keine Wechsel zwischen multiplen Analogien innerhalb eines Themas vorgenommen werden. Außerdem muss der Analogiebereich hinreichend vertraut sein. Der Zusammenhang zwischen Analogiebereich und Zielbereich lässt sich in unseren Fall folgendermaßen darstellen.

<b>Analogbereich</b>		<b>Zielbereich</b>
Lichtschalter	←————→	Bit
Lichtschalter an	←————→	Bit im Zustand 1
Lichtschalter aus	←————→	Bit im Zustand 0
Dimmer	←————→ Analogierelationen	Qubit
Reglereinstellung am Dimmer	←————→	Einer von unendlich vielen Qubitzuständen
Betätigen des Lichtschalters/ Dimmers	↔	Zustandsänderung
Verbindung vom Lichtschalter zur Lampe	←————→	Informationstransfer

Diese Verbindung zum Analogiebereich Lichtschalter/ Dimmer wird im Unterrichtsverlauf bei den einzelnen Themenblöcken des Jupyter Notebooks immer wieder aufgegriffen. So begleitet diese Analogie den gesamten Lernprozess und kann den Schüler\*innen helfen, die neuen komplexen Inhalte zu verstehen.

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass im Bereich der Quantenmechanik oft mit Lernschwierigkeiten gerechnet werden muss. Die Lernschwierigkeiten sind durch eingeprägte Fehlvorstellungen der Schüler\*innen aus der klassischen Physik bedingt. Diese Schülervorstellungen sind sehr gefestigt, da sich die Quantentheorie deutlich von den durch Alltagsphänomene geprägten Unterrichtsinhalten abhebt (Müller & Wiesner, 2009, S.4). Ein Unterrichtskonzept im Bereich der Quantenmechanik muss unter Berücksichtigung dieser Fehlvorstellungen entwickelt werden. Nach den Erfahrungen von Müller & Wiesner hat man vor allem mit Lernschwierigkeiten zu rechnen, die die Vorstellung einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten betrifft. Dies steht in starkem Lernkontrast mit dem probabilistischen Charakter der Quantenmechanik, denn es sind nur Aussagen über die Wahrscheinlichkeit möglich, ein Quantenobjekt bei einer Messung an einem bestimmten Ort zu finden. Es ist die Fehlvorstellung verbreitet, dass Quantenobjekte zu jedem Zeitpunkt einen wohldefinierten Ort besitzen (Müller & Wiesner, 2009, S.4ff.). Als Grundlage hierfür muss die Unbestimmtheitsrelation bekannt oder vorher eingeführt werden. Aus diesem Grund wird genau darauf geachtet, im Jupyter Notebook im Kapitel Wahrscheinlichkeiten, den probabilistischen Charakter tiefgründig zu vermitteln und bei Verständnisproblemen auch lehrerzentriert Lernprobleme zu beseitigen.



In der Vergangenheit wurde sich nach dem Bedeutungsanstieg der Quantenphysik im Fachbereich der Physikdidaktik viele Gedanken darüber gemacht, welcher Zugang zur Quantenphysik am besten ist. Weitverbreitet ist der Einstieg in die Quantenphysik über das Beschreiben und Interpretieren von Experimenten des Doppelspalts oder der Elektronenbeugungsröhre. Alternativ wird in unserer Unterrichtsstunde bewusst der Zugang zur Quantenphysik über Elemente der Quanteninformationstheorie gewählt. Er ermöglicht eine didaktische Reduktion der Sachstruktur im Vergleich zu anderen Herangehensweisen. Im Mittelpunkt stehen dabei nicht die Eigenschaften und Beschreibung von komplexen Objekten wie Atomen oder Elektronen, sondern elementare Quantensysteme, die sogenannten Qubits. Die inhaltliche Aufarbeitung des einfachen Quantensystems soll helfen, begriffliche und mathematische Schwierigkeiten zu minimieren und zentrale Elemente der Theorie qualitativ und quantitativ einzuführen (Dür, 2010, S.1f).

Der Vergleich zu den Elementen der klassischen Informationsverarbeitung, die zu Beginn kurz angesprochen werden, dient dazu, die Unterschiede zur Quanteninformationsverarbeitung zu illustrieren. Hiermit kann zum Teil an Vorwissen angeknüpft und das Interesse geweckt werden, da sich die klassische Informationsverarbeitung in der Realisierung durch die Nutzung technischer Geräte an der Lebenswelt der Jugendlichen orientiert.

### **5.3 Didaktische Strukturierung**

Komplexe Sachstrukturen müssen schrittweise aufgebaut werden. Hier spielt die Zerlegung in elementare Lehr-Lern-Schritte eine große Rolle. In diesem Kapitel soll der Unterrichtsinhalt didaktisch strukturiert werden, damit die einzelnen Abschnitte inhaltlich und im Hinblick auf eine große Lernwirksamkeit bestmöglich aufeinander aufbauen. Zudem werden die einzelnen Unterrichtsphasen auf ihre Funktion hin eingeordnet und bewertet. Die didaktische Strukturierung erfolgt einerseits aus inhaltlicher Perspektive und andererseits aus phasenstruktureller Perspektive.

Zuerst wird der Fokus auf die Anordnung und Auswahl von inhaltlichen Elementen bei der Lernzielerreichung gelegt. Betrachtet man fachliche, lernpsychologische und didaktische Aspekte, die in Kapitel 4 und 5.2 bereits ausgeführt wurden, kann man gewisse Inhaltsbausteine für den Aufbauprozess einer Vorstellungs- und Wissenswelt über die Grundlagen der Quantenmechanik ausfindig machen, die aus den Betrachtungen zur didaktischen Reduktion abgeleitet sind.

Um als Anwendungsbezug zum Ende der Unterrichtsstunde grob zu verstehen, wie Quantencomputer in ihren Grundzügen funktionieren, bedarf es einiger dieser Bausteine, die nacheinander behandelt und miteinander verglichen und in Beziehung gesetzt werden. Die nachfolgende Abbildung visualisiert die Struktur der Unterrichtseinheit in Lehr-Lern-Schritte. Es werden die elementaren Bausteine zum Aufbauen eines Wissensgebäudes dargestellt.

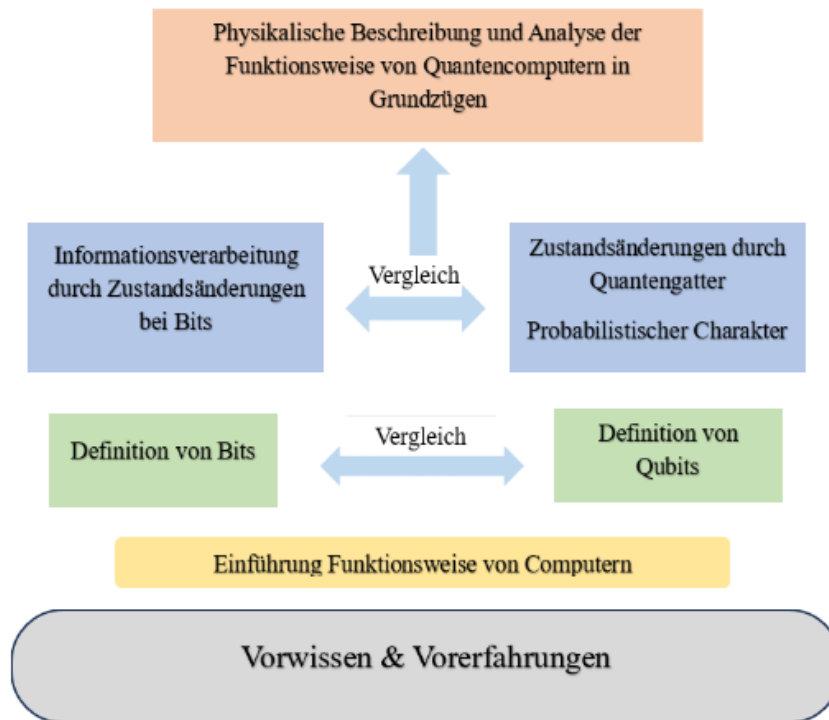


Abb 1: Didaktische Rekonstruktion der Unterrichtsinhalte in Lehr-Lern-Schritte zum Aufbau eines fundierten Wissenszuwachs (eigene Grafik)

Als Basis der Unterrichtsstunde dient das Vorwissen und die Vorerfahrungen. Dazu zählt in besonderer Weise mathematische Grundlagen, die bereits im Schulkontext gelernt wurden. Als Einstieg und Anknüpfungspunkt an das Vorwissen als Voraussetzung für einen erfolgreichen Lernprozess wird auf die Funktionsweise von aktuellen Alltagstechniken wie Computern oder Smartphones eingegangen. Diese Gegenstandswelt ist den Schüler\*innen hinreichend bekannt, was das Interesse für das Thema erhöht. Durch die Wahl dieses Einstiegs kann ein fließender Übergang zu der Definition und Eigenschaftsbeschreibung von Bits gezogen werden, da diese ein wichtiger Bestandteil für die Erklärung der Funktionsweise von Computern sind. Um daran anschließend zur Quanteninformationstheorie überzuleiten, wird immer wieder ein Vergleich zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik, unter anderem am Beispiel von Bits und Qubits sowie deren differenziellen Eigenschaften, gezogen. Auch die Zustandsänderung und die

Informationsverarbeitung wird differenziell betrachtet. Durch diese permanente Gegenüberstellung der verschiedenen Theorien, wird der Unterschied zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik sowie zwischen den verschiedenen technischen Prinzipien klar deutlich. Ein tiefgründiges Verständnis seitens der Schüler\*innen wird so gefördert. Als zusätzliche Eigenschaft, die bei der klassischen Physik nicht vorhanden ist, wird auf den Vergleich aufbauend der probabilistische Charakter der Quantenmechanik thematisiert.

Im Fokus der Unterrichtsstunde soll die Betonung und konsequente Anwendung der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation liegen. Die Bedeutung des quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitskonzepts soll als zentraler Zug von Anfang an herausgestellt werden. Im Jupityer Notebook wird hier durch Hinweistexte, Beispiele und die Veranschaulichung durch Histogramme besonders großer Wert gelegt. Mit Hilfe des Begriffs der Präparation gelingt eine fachlich saubere Formulierung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Zudem müssen die Besonderheiten des quantenmechanischen Messprozesses aufgezeigt werden. Es besteht ein Unterschied zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen“. Diese besondere Rolle muss den Schüler\*innen vereinfacht zugänglich gemacht werden. Im Jupityer Notebook erfolgt die Thematisierung durch einen fachlich reduzierten Infotext mit anschließenden Beispielen.

Auf Basis der bisher erarbeiteten Teilbereiche und Vergleiche zur klassischen Physik werden die Lerninhalte zusammengefügt, um so eine physikalische Beschreibung und Analyse der Funktionsweise von Quantencomputern in ihren Grundzügen vornehmen zu können. Dies bildet das Endprodukt dieses Lernprozesses. Es kann aber auch als Basis für neuen Wissenserwerb im Bereich der Quantenmechanik verstanden werden, auf der durch weiterführende Themen aufgebaut werden kann.

Neben der Anordnung des Sachinhalts muss auch die Phasenstruktur des Unterrichts lernerfolgsorientiert analysiert werden.

Dazu muss sich zunächst die Frage gestellt werden, was soll mit der Unterrichtsstunde erreicht und welche Unterrichtssituation muss mit den Lernenden bewältigt werden. Nach dem Modell der Standardsituationen von Leisen kann die Unterrichtsstunde zunächst einmal der didaktischen Standardsituation „Neues erarbeiten“ zugeordnet werden (Leisen, 2011a, S.93).

Dabei sind spezielle Charakteristika und spezielle Anforderungen an den Unterricht aus fachdidaktischer Perspektive zu beachten. Beim Erlernen von neuen Inhalten muss seitens

der Lehrperson ein reichhaltiges Informationsangebot bereitgestellt und darauf geachtet werden, dass ein angemessener Beschäftigungsgrad aller Lernenden gewährleistet wird. Die verwendeten Materialien steuern und lenken den Lernprozess der Schüler\*innen. Besonders beim Erlernen von neuen Inhalten muss mit unterschiedlichen Bearbeitungstempi und unterschiedlichen Niveaus des Verstehens gerechnet werden. Aus diesem Grund ist eine Binnendifferenzierung nach oben und nach unten notwendig. Die Differenzierung wird durch variable Arbeitsaufträge oder offene Diskussionsfragen sowie durch die Lehrperson gesteuerte Vertiefungsmöglichkeiten während der Gruppenarbeitsphase realisiert. Zudem werden viele verschiedene Zugangsarten angeboten, zum Beispiel, visuell, mathematisch oder sprachlich.

Die Strukturierung der Unterrichtsstunde in verschiedene Phasen erfolgte nach dem Lehr-Lern-Modell von Leisen für einen kompetenzorientierten Unterricht, bei dem ein neues Thema erschlossen werden soll (Leisen, 2011b, S.7 ff.). Speziell wurde auf die Wechselwirkung zwischen dem Lehr- und Lernprozess eingegangen. Den Anfang macht der lehrkraftorientierte Unterrichtseinstieg, inklusive Motivation der Schüler\*innen. Hier beginnt auch schon der erste Lernschritt mit der Entdeckung einer neuen Problemstellung und der Entwicklung von spezifischen Vorstellungen. Es wird ein Lernreiz durch verschiedene Fragestellungen gesetzt, die die Schüler\*innen mit ihrem begrenzten Vorwissen noch nicht beantworten können. Eventuell nützliches individuelles Vorwissen wird in dieser Phase von den Lernenden selbstständig aktiviert und aufgefrischt. Das zentrale Unterrichtsthema wird in dieser Einstiegsphase bereits kurz anmoderiert, um das Verknüpfen mit Vorwissen zu ermöglichen. Die zweite Phase stellt die Erarbeitungsphase dar. In Gruppenarbeit wird entsprechendes Lernmaterial in Form eines Jupyter Notebooks bearbeitet. Hier erhalten die Lernenden neue Informationen, Anstöße von außen und Diskussionsanregungen. Der Aufbau des digitalen Arbeitsblattes steuert zwar in gewisser Weise den Lernprozess, dennoch müssen die Schüler\*innen durch die offene Gestaltung Verantwortung für den Unterricht und das eigene Lernen übernehmen. Das stellt eine gute kompetenzorientierte Fördermöglichkeit dar. Durch die Beantwortung von Kurzfragen zu jedem Themenblock bekommen die Schüler\*innen regelmäßig Feedback zu ihrem Lernprozess und Lernzuwachs. Ziel ist es, ein Lernprodukt zu erstellen. Ist das Jupyter Notebook vollständig bearbeitet, haben sich alle Schüler\*innen ein individuelles Lernprodukt entweder materiell als beantwortete Kurzfragen und vielfältige Diskussionsverläufe oder auf kognitive Art in Form von Erkenntnissen erarbeitet. Dieser Lernschritt ist gekennzeichnet durch den wichtigen Lernzuwachs. Es handelt sich klar um

eine Lernsituation stark abgegrenzt von einer Leistungssituation. Der Lernzuwachs, der Lernmehrwert und die Kompetenzerweiterung wird immer wieder durch gezielte Aufgabenstellungen und Diskussionsfragen versucht zu stabilisieren, zu wiederholen und zu festigen. Somit ist die Übungsphase in die Erarbeitungsphase integriert. Eine Vertiefungsphase schließt sich für die Schüler\*innen, die schon frühzeitig mit der Erarbeitung fertig sind, an. Hier werden die Lernenden durch vertiefende Fragen zum Denken und Anwenden des Erlernten angeregt und gefördert. Danach erfolgt die Ergebnissicherung als Definition des Lernzugewinns und Diskussion des Lernprodukts lehrerzentriert im Plenum. Das Wissen wird zusammengefasst, mit Anwendungsbeispielen verknüpft. Das neue Wissen wird in einen erweiterten und ausgebauten Wissensnetz verankert. Vor allem die realistische Umsetzung des Erlernten für die Funktionsweise von Quantencomputern wird hier thematisiert. Durch ausführliche Beantwortung von abschließenden Fragen wird versucht Lernschwierigkeiten oder Verständnisprobleme zu beseitigen. Ein Ausblick auf vertiefendes Wissen und differentielle Anwendungsgebiete bildet den Abschluss der Sicherungs- und Zusammenfassungsphase und stellt das Ende der Unterrichtsstunde dar.

## **6 Intentionalität und Stundenziele**

Die Auswahl, Formulierung und Anordnung der Ziele des Unterrichts haben entscheidende Funktionen. Für die Lernenden legen diese Ziele fest, was sie lernen sollen. Als Lehrende geben Ziele eine Orientierung für das Treffen von Planungsentscheidungen und eröffnen nach dem Unterricht die Möglichkeit, die Lernwirksamkeit der Entscheidungen zu analysieren. Die formulierten Ziele beschreiben die Intentionalität der Unterrichtsstunde und stellen die geförderten inhaltsbezogenen und prozessbezogenen Kompetenzen konkret dar. Im Schulkontext gibt es bei den meisten Inhalten verbindliche Vorgaben bei der Wahl der Ziele in Form von Kompetenzen in den Kerncurricula für das jeweilige Fach und die Schulstufe. Da die Thematik der Quantenmechanik mit dem Zugang über die Quanteninformationstheorie in den Kerncurricula als Pflichtthema noch keinen direkten Einzug gefunden hat (ausgeführt in Kapitel 5.1), gibt es hier wenig Eingrenzungen und Vorgaben bei der Formulierung der Ziele.

Bei der Formulierung zur Feststellung der Intentionalität ist es wichtig Ziele zu operationalisieren, wodurch nicht beobachtbare Lernprozesse und Ergebnisse beobachtbar gemacht werden können. Zudem können Ziele nach dem bekannten Klassifikationssystem von Bloom (Kircher & Girwidz, 2020b, S.88ff) einem Lernbereich zugeordnet werden.

Hierbei wird untersucht, ob die Lernenden zum Denken (kognitive Dimension), Handeln (pragmatische/psychomotorische Dimension) oder Fühlen (affektive Dimension) angeregt werden. Die kognitive Dimension umfasst intellektuelle Ziele, die das Denken, Verstehen oder Problemlösen betreffen. Unter der affektiven Dimension versteht man Ziele, die im Zusammenhang mit Interesse, Einstellungen, Werten oder Überzeugungen stehen. Lernziele in der psychomotorischen Dimension sind auf die willentliche, muskuläre und motorische Bewegung und das eigene Tun gerichtet. Zur Konkretisierung bietet sich an, eine Lernzielhierarchie mit der Unterscheidung von Richt-, Grob- und Feinzielen zu erstellen. Solche Lernzieltaxonomien bieten eine präzise Möglichkeit, die beabsichtigten Lernziele zu unterscheiden und zu ordnen. Diese Möglichkeit eröffnet die Chance, die weiteren Planungsentscheidungen genau mit den Zielen abzustimmen und die Lernwirksamkeit des Unterrichts differenziert zu evaluieren.

Im Folgenden werden das Hauptziel und mehrere Teillernziele nach der Bloom'schen Lernzieltaxonomie der Projektstunde formuliert.

### **Hauptlernziel**

Die Schüler\*innen verstehen die grundlegenden Elemente der Quantenmechanik und können diese miteinander in Verbindung setzen.

### **Teillernziele / Feinziele**

- Die Schüler\*innen verwenden die Begriffe Bit, Qubit und Zustand im richtigen physikalischen Zusammenhang  
(Dimension: affektiv, Stufe: Anwenden und Reagieren)
- Die Schüler\*innen erweitern und wiederholen ihre Grundkenntnisse über die Funktionsweise von klassischen digitalen Geräten insbesondere der Informationsverarbeitung durch Bits  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Wissen, Lernziel nach der Einführungsphase erreicht)
- Die Schüler\*innen kennen die Unterschiede in den Eigenschaften von Bits und Qubits und übertragen diese auf die Funktionsweisen -> Minimalziel  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Wissen und Synthetisieren)
- Die Schüler\*innen verstehen das Prinzip der Superposition bei Qubitzuständen als Überlagerung zweier Zustände.  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Verstehen)

- Die Schüler\*innen werten die Vorteile von Qubits durch die Möglichkeit unendlich viele Zustände annehmen zu können  
(Dimension: affektiv, Stufe: Werten)
- Die Schüler\*innen kennen die Funktion von klassischen und quantenmechanischen Gattern in ihren Grundzügen und können sie auf eingehende Bits/Qubits anwenden (einzelne Gatter müssen nicht vollständig erlernt werden. Sie dienen nur der beispielhaften Visualisierung).  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Verstehen und Anwenden)
- Die Schüler\*innen sind in der Lage Qubitzustände auf einer Blochkugel darzustellen  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Anwenden und Synthetisieren)
- Die Schüler\*innen wissen, dass es sich bei der Quantenmechanik um eine probabilistische Theorie handelt und dass Messergebnisse statistisch verteilt sind.  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Wissen) -> Minimalziel
- Die Schüler\*innen können mit Histogrammen als Darstellungsform von quantenmechanischen Messprozessen umgehen und diese ergebnisorientiert interpretieren.  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Synthetisieren und Anwenden)
- Die Schüler\*innen evaluieren Vorteile für die technische Anwendung in Quantencomputern und können zukünftige Anwendungsgebiete benennen.  
(Dimension: kognitiv, Stufe: Evaluieren) -> Maximalziel

Ob die Schüler\*innen die verschiedenen Teillernziele erreicht haben, kann durch die Beantwortung der Kurzfragen in den Kapiteln des Jupyter Notebooks individuell überprüft werden. Somit wird den Schüler\*innen direkt Feedback zu ihrem Lernprozess gegeben und die Lehrperson kann die Lernwirksamkeit beurteilen.

Ausgeschrieben sind zwei Minimalziele. Diese Lernziele sollten alle Schüler\*innen zwingend erreichen, da sie die Basis des Lerninhalts bilden und die wichtigsten Wissens Elemente darstellen.

Das Maximalziel stellt den optimalen Lernerfolg dar. Schüler\*innen, die dieses Lernziel erreicht haben, sind in der Lage, das erlernte Wissen über die Grundlagen der Quanteninformationstheorie detailliert auf Anwendungsgebiete übertragen zu können. Sie verstehen, wie die Umsetzung in Quantencomputern funktionieren kann und welche Vorteile dies für die technische Zukunft bietet.

## 7 Methodische Überlegungen

Unter der Unterrichtsmethodik versteht man alle Aspekte, die das „Wie“ des Unterrichts beschreiben, also Formen, Verfahren und die Verlaufsgestalt, mit denen Lehrpersonen den Lehr-Lernprozess gestalten. In diesem Zuge enthält das Kapitel eine Darstellung, wie die didaktische Abfolge unter Berücksichtigung der Bedingungsanalyse umgesetzt wurde. Es enthält Begründungen der Sozial-, Handlungs- und Prozessstruktur des Unterrichts, wie zum Beispiel Sozialformen, Handlungsmuster, Arbeitsformen, Medien als Arbeitsmittel und Lehraktionen. Zudem erfolgt eine Analyse der konkreten Arbeitsaufträge, das Formulieren von Erwartungshorizonten und das Aufzeigen der Möglichkeiten Teilziele zu überprüfen. Unter der Berücksichtigung der Bedingungsanalyse und der weiteren Planungsentscheidungen werden methodische Entscheidungen begründet.

Zur Sichtstruktur des Unterrichts zählen die wahrnehmbaren physikalisch-methodischen Überlegungen. Als strukturelle Rahmenbedingung handelt es sich bei der Projektstunde um leistungsdifferenzierte Lerngruppen. Alle Schüler\*innen belegen das Fach Physik als Leistungskurs in der gymnasialen Oberstufe, was eine gewisse Homogenität in der Gestaltung der Leistungsanforderungen ermöglicht. Unterrichtet wird im Kursmodell. Als Unterrichtskonzept wird hier von gelenkt entdeckendem Unterricht gesprochen. Dabei lernen die Jugendlichen vor allem naturwissenschaftliche Fähigkeiten und Fertigkeiten. Entdeckendes Lernen geschieht häufig in den Sozialformen Gruppenunterricht und individualisierter Unterricht. In unserer Projektstunde wurde hauptsächlich in der Sozialform Gruppenarbeit gearbeitet. Die Aufgaben des Jupyter Notebooks sollten gemeinschaftlich in Gruppen aus drei bis vier Schüler\*innen bearbeitet werden. Damit sind auch soziale Ziele involviert, wie Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft, Einstellungen wie Flexibilität und Ausdauer bei der Lösung von physikalisch technischen Problemen und Werthaltungen. Die Schüler\*innen lernen Meinungen anderer zu akzeptieren und sich gegenseitig beim Lernprozess zu unterstützen. Auch die Kommunikationsfähigkeit und allgemeine soziale Kompetenz wird durch die Gruppenarbeit unterbewusst geschult. Die Gruppen wurden in allen drei Projektklassen ohne Vorgaben von den Schüler\*innen selbst zusammengestellt. So ergaben sich sowohl leistungshomogene als auch leistungsheterogene Gruppen. Interessanterweise konnten trotzdem in fast allen Gruppen effektive und kollaborative Lernprozesse beobachtet werden. In den leistungshomogenen Gruppen konnten Diskussionen auf hohem inhaltlichem Niveau, teilweise sogar über den vorgesehenen Lernstoff hinaus, geführt werden. In den leistungsheterogenen Gruppen war



die Unterstützung von leistungsschwächeren Schüler\*innen zu beobachten, wodurch der Lernprozess weiter angetrieben wurde und mehr Schüler\*innen die Lernziele erreichen konnten. Allgemein haben alle Gruppen ohne direkte Führung der Lehrpersonen einen guten Lernerfolg erreichen können. Damit die Zusammenarbeit in den Gruppen strukturiert bleibt und alle Schüler\*innen aktiv am Jupyter Notebook mitarbeiten, wurden die Gruppen bewusst auf drei bis vier Teilnehmende beschränkt. Trotz der Gruppenarbeit hatten alle Lernenden ein eigenes Notebook, um die Inhalte und Kurzfragen auch allein bearbeiten sowie die Infotexte individuell lesen zu können.

Die Einführung, die Ergebnissicherung und Zusammenfassung wurden im Plenum lehrer\*innenzentriert durchgeführt. Begründet wird diese Sozialform mit dem Anspruch, möglichst gleiche Lernvoraussetzungen für alle Lernenden zu schaffen. Durch eine gemeinsame Zusammenfassung des Gelernten am Ende der Erarbeitungsphase sollen Verständnisprobleme beseitigt und allen Schüler\*innen noch einmal geordnet vermittelt werden, was die entscheidenden Aspekte der Quantenmechanik sind.

Da der Hauptteil der Unterrichtsstunde, insbesondere der Erarbeitungsphase, in Gruppenarbeit durchgeführt wird, ist die Handlungsform des Lehrens eher hintergründlich und zumeist unterstützend oder beratend angelegt. Die Schüler\*innen agieren, der Lernprozess wird individuell und selbstständig gesteuert und die Lehrpersonen beraten nur bei Problemen. Die Schüler\*innen bestimmen das Lerntempo innerhalb der Gruppen weitestgehend selbstständig. Es werden lediglich große Zeiträume für die einzelnen Themenblöcke vorgegeben. Die Lehrpersonen beobachten die Gruppen während der Erarbeitungsphase intensiv, sollten dabei die Gruppendynamik aber nicht stören. Bei auftretenden Fragen oder Verständnisproblemen, helfen die Lehrenden mit Erklärungsansätzen oder anregenden Fragen. Gruppen, die bereits vor dem Ende der Bearbeitungszeit fertig sind, bekommen von den Lehrpersonen vertiefende Fragen oder Fragen zur Anwendung gestellt. Eine Beispielfrage ist, wie die erlernten Aspekte über Qubits und deren Eigenschaften zur schnelleren Problemlösung in Quantencomputern eingesetzt werden können. Hier lenkt die Lehrperson zwar wieder aktiv den Lernprozess, doch durch die Offenheit der gestellten Fragen, werden weiterhin individuelle Gruppendiskussionen angeregt.

In der lehrerzentrierten Einführung ist die Lehrkraft in der Verpflichtung, durch einen interessanten Einstieg die Motivation der Schüler\*innen anzuregen und ein Interesse an den Lerninhalten zu wecken. Dazu muss die digitale Präsentation mit motivierenden Fakten oder interessanten Bildern angereichert werden. Zudem ist es hilfreich, wenn die Lehrkraft die

eigene Begeisterung für das Thema durch eine enthusiastische Präsentationsform an die Schüler\*innen übertragen kann.

Um das Interesse für das Thema auch nachhaltig zu fördern, ist die Lehrkraft besonders am Ende der Unterrichtsstunde in der Pflicht, einen Einblick in interessante vertiefende Bereiche zu geben. Den Schüler\*innen muss erkenntlich sein, was ihnen das Erlernen des Unterrichtsinhaltes gebracht hat. Dies gelingt am besten durch interessante, lebensweltnahe Anwendungsgebiete, wie in unserem Fall konkreten Einsatzgebieten und Vorteilen von Quantencomputern. Um diesen Aufgaben gerecht zu werden, müssen sich die Lehrpersonen im Vorhinein tiefgründig mit dem Thema Quantenmechanik und Quanteninformationstheorie auseinandersetzen und einen eigenen Wissenspool aufbauen. Nur so kann der Lerninhalt erfolgreich an Schüler\*innen vermittelt und aufkommende Fragen wissenschaftlich korrekt beantwortet werden.

## **7.1 Aufgabenanalyse der Arbeit am Jupyter Notebook**

Aufgaben im Unterricht haben verschiedene Funktionen. Sie können zum Lernen, zum Üben, zur Überprüfung des Kompetenzerwerbs und zur Leistungsbewertung eingesetzt werden. Entsprechend dieser Funktion haben sie eine andere Form oder Umfang. In einer klassischen Ersterarbeitungsphase von neuen Inhalten wie in unserem Fall, helfen Aufgaben den Schüler\*innen beim Erfassen neuer Begriffe, Konzepte und Gesetze. Dabei müssen die Aufgaben angemessen strukturiert sein und sich sowohl auf das Vorwissen als auch auf die jeweils zu erwerbenden Kompetenzen beziehen. Regelmäßige Rückmeldungen über mögliche Verständnisschwierigkeiten oder Lösungswege dienen als Orientierung und unterstützen den Wissenserwerb. Um das neue Wissen üben zu können, sollen Lernergebnisse gesichert, vertieft und transferiert werden. Die Aufgaben sind so zu konzipieren, dass sowohl prozess- also auch inhaltsbezogene Kompetenzen Anwendung finden.

Im Zuge der Erarbeitungsphase sollen die Schüler\*innen in Gruppenarbeit das Jupyter Notebook bearbeiten. Um den Inhalt zu strukturieren und den Lernprozess zu steuern, wurde der Lernstoff über die quantenmechanischen Grundlagen in Themenbereiche eingeteilt, die nacheinander bearbeitet werden. Die Themenbereiche bauen inhaltlich aufeinander auf. Auch die Komplexität der Sachinhalte nimmt zu. Im Sinne der Binnendifferenzierung können sich leistungsschwächere Schüler\*innen dann länger mit einfacheren Grundlagen beschäftigen, während sich leistungsstarke Schüler\*innen schon auf aufbauende komplexere

Inhalte fokussieren können. Das Jupyter Notebook ist in folgende Themenbereiche unterteilt:

- Bit vs. Qubit
- Logische Gatter vs. Quantengatter
- Zustände verändern – Quantenschaltkreise
- Wahrscheinlichkeiten

Die einzelnen Themenbereiche sind strukturell ähnlich aufgebaut. Der Sachgegenstand wird zuerst in Form eines kurzen Informationstextes dargelegt. Anhand von praktischen Anwendungsbeispielen wird der theoretische Aspekt dann veranschaulicht. Hier werden meist verschiedene Zugänge gewählt. Am Ende des theoretischen Inputs wird eine Frage zur Gruppendiskussion gestellt, um den Lernprozess durch die Gruppendynamik voranzutreiben und zu bewirken, dass sich alle Schüler\*innen tiefgründig mit dem Sachgegenstand auseinandersetzen. Die Aufgaben zu den Gruppendiskussion sind so gestellt, dass sie ein Verstehen der theoretischen Inhalte voraussetzt und auf ein Transferieren auf bestimmte Sachverhalte abzielt. Dabei sollen häufig Lösungen und Antworten auf bestimmte Probleme gefunden werden. Es werden metakognitive Fragen aufgeworfen.

Eine mögliche Antwort auf die Diskussionsfrage wird im Anschluss nach dem Ausführen der nächsten Zelle des Notebooks aufgezeigt. Dies dient dazu, dass Gruppen, die die Frage nicht vollständig beantworten können, Verständnisprobleme beseitigen können oder aber auch die eigene Antwort auf Richtigkeit überprüfen können.

Um zu überprüfen, ob sich ausreichend mit dem Themenbereich beschäftigt und alle Inhalte verstanden wurden, können die Schüler\*innen im Anschluss Kurzfragen über den Sachgegenstand beantworten. Häufig wird hier schon eine Anwendung und ein Transfer des Wissens verlangt. So kann geschaut werden, ob der Inhalt wirklich verstanden wurde oder ob die Informationstexte nur oberflächlich gelesen wurden. Bei den Kurzfragen handelt es sich um Single Choice Fragen. Das Notebook ist so programmiert, dass nach Eingabe der Antwort durch die Lernenden gleich angezeigt wird, ob die Antwort richtig oder falsch ist. Dadurch erlangen die Schüler\*innen direktes Feedback zum Lernprozess.

Der Abschluss jeden Themenbereichs bildet ein Merkkasten, der die wichtigsten Aspekte des Sachgegenstandes kurz zusammenfasst. Dies soll den Schüler\*innen helfen, das neue Wissen einzuordnen und noch einmal über das Erlernte nachzudenken. Wichtig ist, dass die Schüler\*innen die Aspekte des Merkkasten verstanden haben, denn darauf wird im weiteren

Verlauf des Notebooks aufgebaut. Beherrschen alle Schüler\*innen die Inhalte der verschiedenen Merkkästen ist das Minimalziel erreicht.

Am Ende des Notebooks werden die einzelnen inhaltlichen Bausteine in einem abschließenden Quiz aus Single Choice Fragen in Verbindung gesetzt. Hier bekommen die Schüler\*innen erneutes Feedback zu ihrem bisherigen Lernprozess.

Die Aufgaben des Jupyter Notebooks stehen also ganz im Zeichen einer Erarbeitung von neuen Inhalten und haben die Funktion, Begriffe und Konzepte zu erfassen, diese anwendungsbezogen zu üben und den Lernprozess zu überprüfen. Eine ausführliche Analyse des Notebooks aus fachwissenschaftlicher Sicht, sowie der Prozess der Implementierung wird in der Bachelorarbeit von Ole Grimsel mit dem Titel „Grundlagen der Quantenmechanik und Qiskit für Quantencomputing“ ausgeführt.

## **8 Verlaufsplan**

Um die Lehr-Lern-Schrittfolge und die Strukturierung übersichtlich darstellen zu können, wird bei der didaktischen Analyse ein Verlaufsplan erstellt. Dieser enthält, neben den Phasen des Unterrichts, einen zeitlichen Rahmenplan, didaktische Hinweise und eine Darstellung der Unterrichtsinhalte. Aus Zwecken der Übersichtlichkeit befindet sich der tabellarische Verlaufsplan im Anhang auf den Seiten 59-61.

## **9 Reflexion der Durchführung**

Nur durch eine tiefgründige und datenbasierte Reflexion kann eine Unterrichtsstunde auf ihre Lernwirksamkeit hin analysiert werden. Es folgt eine Reflexion der Lernzielerreichung, eine Bewertung der Wirksamkeit des geplanten Vorgehens im Hinblick auf die Aktivierung der Schüler\*innen und eine Auswertung des Wissenserwerbs. Diese Analyse erfolgt auf Basis der empirischen Daten aus der Schüler\*innenbefragung in Triangulation mit den Beobachtungen und den Lehrer\*inneninterviews. Eine ausführliche Reflexion und Analyse der empirischen Daten ist in der Bachelorarbeit von Maren Lankhorst mit dem Titel „Statistische Analyse der konzeptionellen Durchführung einer Unterrichtsstunde zur Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen“ zu finden.

Zuerst werden unabhängig vom Lernerfolg einige grundlegende Beobachtungen zur Durchführung der drei Unterrichtsstunden ausgeführt. Die Aufzeichnungen aus den Beobachtungen während der Durchführung wurden im Anhang auf den Seiten 49-51 verschriftlicht. Hieraus wurden die folgenden Kenntnisse gezogen. Diese könnten in zukünftigen Umsetzungen Anwendung finden.

Mit technischen Problemen muss jederzeit gerechnet werden. Die Nutzung digitaler Medien im Schulunterricht eröffnet zwar vielseitige Möglichkeiten und Chancen, kann aber auch zu unerwarteten Problemen führen, etwa bei der Einrichtung der Geräte, der Verbindung zum Internet oder der Bearbeitung der digitalen Aufgaben. Schon bei der Planung muss darauf Rücksicht genommen und mögliche Alternativen vorbereitet werden. Außerdem können digitale Geräte die Ablenkung der Schüler\*innen begünstigen. Es muss besonders in der Gruppenarbeit regelmäßig kontrolliert werden, ob sich die Schüler\*innen noch mit den Lerninhalten beschäftigen oder sich auf anderen Internetseiten bewegen.

Die Gruppenarbeit stellt die zentrale Sozialform der Unterrichtsstunde dar. In allen drei Lerngruppen wurden die Gruppen von den Schüler\*innen selbstständig gebildet. Dies führte teilweise zu sehr heterogenen oder sehr homogenen Gruppen, wobei sich sowohl Vor- als auch Nachteile heraus kristallisierten. Bei der Gruppenkonstellation sollte darauf geachtet werden, dass leistungsschwache Schüler\*innen auf Gruppen mit leistungsstarken Schüler\*innen verteilt werden. So können Synergieeffekte beim Lernen entstehen. Die schwächeren Schüler\*innen profitieren von dem Wissen der leistungsstarken Schüler\*innen und werden so im Lernprozess unterstützt. Besonders homogene Gruppen auf einem geringen Leistungsniveau waren bei der Durchführung der Unterrichtsstunde häufig negativ auffällig. Sie ließen sich schnell ablenken, beschäftigten sich nur oberflächlich mit den Aufgaben und thematisierten im Diskussionsgespräch unterrichtsferne Themen. Dadurch waren sie nicht in der Lage, die Lernziele zu erreichen. Gruppen auf sehr hohem Leistungsniveau und mit außerschulischem Interesse an Themen der Informatik, bearbeiteten die Lerninhalte sehr intensiv und waren schnell mit dem Bearbeiten des digitalen Arbeitsblatts fertig. Für sie war der Inhalt teilweise zu basal.

Aus dieser Heterogenität zwischen den einzelnen Gruppen in allen drei Lerngruppen resultiert der zukünftige Anspruch einer stärkeren Binnendifferenzierung in beide Richtungen, beispielsweise durch Zusatzaufgaben oder fördernde Lernhilfen.

Aus den Beobachtungen zur Gruppendynamik wurde deutlich, dass die Lerngruppen konkretere und inhaltlich fundiertere Diskussionsanregungen und Arbeitsaufträge benötigen. Ohne die nötigen Vorgaben fielen die Gruppendiskussionen eher spärlich aus, was sich negativ auf den kollaborativen Lernerfolg auswirkt. Die Schüler\*innen beschäftigen sich dann nur oberflächlich mit den Inhalten und klicken sich vielmehr durch die einzelnen Zellen des Notebooks. Eine Gruppengröße von maximal vier Lernenden scheint für das Bewirken kollaborativer Effekte im Lernprozess sinnvoll.

Als hilfreiche Strukturvorgabe erwies sich das Aussprechen von Bearbeitungszeiten für die einzelnen Themenbereiche des Notebooks. Es war strukturgebend, in allen Lerngruppen 20 Minuten für die Bearbeitung der ersten beiden Themenblöcke und ungefähr 30 Minuten für die restlichen Themen einzukalkulieren. So konnte sichergestellt werden, dass sich alle Gruppen in angemessenem Umfang mit den Lerninhalten der Themenbereiche beschäftigen. Zur Überleitung in die Phase der Ergebnissicherung und Zusammenfassung wurde in allen drei Lerngruppen die vertiefende Frage gestellt, wie mit Quantencomputern ein verbesserter Rechenprozess umgesetzt werden kann. Hier wurden viele Schüler\*innen dazu aktiviert, ihr angeeignetes Wissen zu transferieren und im Zuge der Anwendung bei Quantencomputern zu übertragen. Die vertiefende Frage erwies sich als besonders sinnvoll, um in der Zusammenfassung auf die technischen Vorteile durch die Realisierung von Quantencomputern einzugehen.

Die Schüler\*innenbefragung liefert zahlreiche empirische Daten, aus denen man Rückschlüsse auf die Lernwirksamkeit und den Lernerfolg der Projektstunde ziehen kann. Die Schüler\*innen beantworteten Wissensfragen über den Lerninhalt. Hier kann erkannt werden, ob die Lernenden den Sachgegenstand verstanden haben und ihn auf andere Sachverhalte anwenden können. Auch die Fragen zur eigenen Einschätzung über erworbene Kenntnisse können zur Interpretation und Analyse der Lernwirksamkeit herangezogen werden. Der Lernerfolg wird über das Erreichen der verschiedenen Lernziele definiert. Wie viele Schüler\*innen die Lernziele erreicht haben, ist aus bestimmten Fragen des Schüler\*innenfragebogens zu interpretieren. Die Antworten zu den ausgewählten Fragen sind im Anhang auf den Seiten 52-58.

Betrachtet werden zuerst die Minimalziele. Diese sind auf sehr basalem Niveau im Anforderungsbereich 1 zu verorten und sollten von allen Schüler\*innen erreicht worden sein.

Das Erreichen des Minimalziels „Die Schüler\*innen kennen die Unterschiede in den Eigenschaften von Bits und Qubits und übertragen diese auf die Funktionsweisen“, lässt sich durch die Antworten auf die Wissensfragen 13, 15 und 16 überprüfen. Die Fragen, wie viele Zustände ein Bit bzw. ein Qubit annehmen kann (Fragen 13 und 16 des Fragebogens, siehe Anhang, S.52 und 54), beantworteten 45 der 46 teilnehmenden Schüler\*innen richtig. Bei der Zustandsanzahl von Qubits antworteten allerdings viele Schüler\*innen mit nahezu unendlich. Dies ist physikalisch nicht ganz richtig, entspricht aber einem richtigen Vorstellungsbild. Zudem waren alle teilnehmenden Schüler\*innen in der Lage, einen funktionellen Unterschied zwischen Bit und Qubit in einer freien Textfrage zu nennen. Hier

ergaben sich vielfältige richtige Antwortmöglichkeiten. Aufgrund der hohen Prozentzahl an richtigen Antworten bei den drei Fragen, kann das Minimalziel als erreicht eingestuft werden. Die Lernwirksamkeit der Unterrichtsstunde in diesem Themenbereich ist somit nachweislich sehr hoch. Alle Schüler\*innen haben sich neues Wissen angeeignet und können dieses nach der Erarbeitung wiedergeben. Der Großteil der Schüler\*innen gibt an, zu wissen, was Qubits sind, welche Eigenschaften sie besitzen und verstehen die Vorteile von quantenmechanischen Systemen (siehe Skalenfragen 23 und 25, Anhang, S. 57).

Bei dem Erreichen des zweiten Minimalziels „Die Schüler\*innen wissen, dass es sich bei der Quantenmechanik um eine probabilistische Theorie handelt und dass Messergebnisse statistisch verteilt sind“, gab es hingegen bei manchen Schüler\*innen Verständnisprobleme und Fehlvorstellungen. Nur 24 der 46 Schüler\*innen beantworteten die Frage 20 (Anhang, S. 56), was für eine Aussage der Messprozess in der Quantenmechanik hat, überhaupt. Davon deuteten viele Antworten auf den probabilistischen Charakter des Messprozesses hin. Teilweise war die Ausdrucksweise hier eher unphysikalisch, aber trotzdem mit dem entsprechenden Inhalt. Auch bei der Skalenfrage geben einige Schüler\*innen an, nicht so gut verstanden zu haben, dass quantenmechanische Messungen nur Vorhersagen über den Zustand eines Qubits liefern. Dieses Ergebnis kann auf die Komplexität des Themenbereichs und auf den starken Lernkontrast zu den Prinzipien der klassischen Physik mit einer permanenten Lokalisierung zurückgeführt werden. Der Sachinhalt ist schwer zu verstehen und die Alltagsvorstellungen der Schüler\*innen stehen dazu in großer Diskrepanz. Damit alle Schüler\*innen dieses Minimalziel erreichen, müsste man sich noch intensiver mit der Thematik auseinandersetzen und vielseitigere Zugänge anbieten. Dies ist angesichts der begrenzten Zeit von 90 Minuten in einer Projektstunde nicht realisierbar. Hier kann aber als Weiterführung für folgende aufbauende Lerneinheiten angesetzt werden.

Ob Schüler\*innen das Maximalziel „Die Schüler\*innen evaluieren Vorteile für die technische Anwendung in Quantencomputern und können zukünftige Anwendungsgebiete benennen“, erreicht haben, ist aus den Beobachtungen des Unterrichts erkenntlich. Bei der Diskussion der Vertiefungsfrage im Anschluss an die Erarbeitungsphase beteiligten sich in den Lerngruppen einige leistungsstarke Schüler\*innen. Auf die Frage, wie mit Quantencomputern ein verbesserter Rechenprozess umgesetzt werden kann, antworteten pro Lerngruppe 2-5 Schüler\*innen mit wissenschaftlich aussagekräftigen Antworten, die die Frage teilweise richtig beantworteten. Auch wenn die fachwissenschaftliche Antwort abschließend noch einmal von der Lehrperson ausführlich formuliert wurde, zeugt die Beteiligung im Plenum davon, dass einige Lernende im Lernprozess sich ausreichend

Wissen angeeignet haben, um das erlernte quantenmechanische Grundwissen auf die Anwendung in Quantencomputern zu übertragen.

Auf Basis des Fragebogens können interessante Beobachtungen beim Präferieren verschiedener Zugänge in der Darstellungsform von Zuständen gemacht werden. In Frage 18 (Anhang S. 55f) sollten die Schüler\*innen eine Möglichkeit nennen, Zustände von Qubits darzustellen. Zu gleichen Teilen wählten die Schüler\*innen die Darstellung in Form eines Vektors auf der Blochkugel oder die mathematische Formulierung in der Dirac-Schreibweise. Daraus lässt sich schließen, dass die Schüler\*innen individuell unterschiedliche Darstellungsformen präferieren und unterschiedliche Zugänge bevorzugen. Dies stellt wiederum den Anspruch an die Lehrpersonen, möglichst viele verschiedene Zugänge bei dem Vermittlungsprozess der Grundlagen der Quantenmechanik zur Verfügung zu stellen. Damit können sich die Schüler\*innen individuell den Zugang für einen größtmöglichen Lernerfolg aussuchen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass aufgrund des Erreichens der Minimalziele und des Maximalziels ein Lernerfolg bei allen Schüler\*innen zu verzeichnen ist. Die Lernwirksamkeit der Stunde lässt sich folglich als hoch einstufen. Allerdings offenbart sich auch das Potenzial zur Verbesserung oder Ausweitung der Lerneinheit, die in Zukunft für die Maximierung des Lernerfolgs der Schüler\*innen umgesetzt werden können.

## **10 Abschließende Bewertung der Unterrichtsstunde**

Nach der ausführlichen didaktischen Analyse der durchgeführten Unterrichtsstunde in den Bereichen Planung, Methodik, Didaktik und Intentionalität kann eine abschließende Bewertung und Reflexion der Projektstunde formuliert werden.

Das geplante Vorgehen konnte mit einer hohen Wirksamkeit in allen drei Lerngruppen umgesetzt werden. Die Planungsschritte konnten durch die geführten Interviews mit den zuständigen Lehrkräften lerngruppenspezifisch erfolgen, was es ermöglichte, die Lerneinheit an die entsprechenden Physikkurse anzupassen. Die Bedingungsanalyse erwies sich in diesem Zuge auch im Hinblick auf den Lernerfolg als sinnvoll und unabdingbar. Nur so konnte am Vorwissen der Schüler\*innen angeknüpft, gegebene Rahmenbedingungen beachtet und so ein fließender Einstieg in die Lerninhalte gewährleistet werden.

Der didaktische Aufbau der Unterrichtsstunde inklusive der vorgenommenen didaktischen Reduktion erwies sich dem Leistungsniveau der heterogenen Lerngruppen als angemessen. Die Schüler\*innen konnten zu großen Teilen aktiviert werden und waren in der Lage, sich in Gruppenarbeit neues Wissen über die quantenmechanischen Grundlagen anzueignen. Der



Sachgegenstand wurde in Form des Jupyter Notebooks so aufgearbeitet, dass es allen Gruppen möglich war, die Aufgaben erfolgreich zu bearbeiten und die Lerninhalte tiefgründig zu verstehen. Der strukturelle Aufbau des Notebooks erwies sich ebenfalls als sinnvoll. Die einzelnen Themenbereiche konnten aufbauend aufeinander durchgearbeitet werden. Die komplexeren Themen am Ende der Erarbeitungsphase waren mit dem bis dahin erworbenen Kenntnissen über die Grundlagen der Quantenmechanik gut zu verstehen.

In diesem Zuge wurden die Minimalziele von fast allen Schüler\*innen erreicht. Dies zeugt für eine hohe Lernwirksamkeit bei der gewählten Vermittlungsform quantenmechanischer Grundlagen. Trotz der durchaus positiven Bilanz muss festgehalten werden, dass nicht alle Lernziele von allen Schüler\*innen erreicht wurden. Dies kann durch die Heterogenität der Lerngruppen und die zeitlichen Begrenzung der Lerneinheit verursacht sein. Um einen nachhaltigen und vollständigen Lernzuwachs bei allen Lernenden erreichen zu können, bedarf es weiterer Stunden, um das neue Wissen zu festigen, zu vertiefen und zu üben. Besonders den leistungsschwachen Schüler\*innen fiel es teilweise schwer, den komplexen Sachinhalten zu folgen und diese zu verstehen. Diesen Schüler\*innen helfen vielfältige Zugänge und differentielle Erklärungsansätze, die ausführlich über einen längeren Zeitraum vermittelt werden.

Betrachtet man die Unterrichtsstunde für ihre Funktionalität der Transformation quantenphysikalischer Inhalte in den Schulkontext, kann der gewählte Zugang durch Elemente der Quanteninformationstheorie als sinnvoll und gewinnbringend bewertet werden. Im Vergleich zu den herkömmlichen Einstiegen in die Quantenphysik über Experimente, wie dem Doppelspalt oder der Elektronenbeugungsröhre, ermöglicht der Ansatz eine didaktische Reduktion der Sachstruktur. Bei dem Zugang über die Grundlagen der Quanteninformationstheorie stehen nicht komplexe Objekte wie Atome oder Elektronen im Mittelpunkt, sondern Qubits als elementare Quantensysteme. So können begriffliche und mathematische Schwierigkeiten minimiert und die zentralen Elemente der Theorie qualitativ und quantitativ eingeführt werden.

Aufgrund des Bedeutungsanstiegs der Quantenphysik bei der Vermittlung in der Schule, muss weiter erforscht werden, welcher Zugang zur Quantenphysik am besten ist. Dieses Projekt begründet die besondere Eignung des neuartigen Zugangs über die Grundlagen der Quantenmechanik und soll auch zukünftig als Denkanstoß verstanden werden, ähnliche Unterrichtskonzepte zu entwickeln. Nur so kann die Vermittlung verbessert und den Schüler\*innen ein optimales Lernangebot gewährleistet werden. Ziel muss es außerdem

sein, die Erkenntnisse in einer Transformation in den regulären Unterricht anzuwenden, um der wachsenden Bedeutung der Quantenphysik gerecht zu werden.

Die Erkenntnisse aus der Analyse der Projektstunde zur Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen kann auch für weiterführende Forschungen in diesem Bereich verwendet werden. Auch im außerschulischen Kontext in weiteren Bereichen der Gesellschaft gewinnt das Thema Quantenmechanik und die technische Umsetzung der entsprechenden Theorien immer mehr an Bedeutung. Der Anspruch, die technische Entwicklung mit Quantencomputern weiter voranzutreiben, geht einher mit der Optimierung der Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen an die verschiedensten Gesellschaftsgruppen.

Besonders in der Wirtschaft zielt die Forschung darauf ab, einen großen Nutzen aus den Vorteilen der Quantenrechner zu ziehen. Dazu zählen verbesserte Rechenleistungen, die Optimierung von Lieferketten oder Routen und die Verbesserung in vielen weiteren wirtschaftlichen Bereichen. Eine Vermittlung von Wissen über die entsprechenden Funktionsweisen und damit einhergehenden Grundlagen der Quantenmechanik sind dabei von entscheidender Rolle. Auch in diesem Zuge leistet das Projekt mit seinen vielseitigen Erkenntnissen einen entscheidenden Beitrag, den es gilt zu nutzen und weiter auszuführen.

## Literaturverzeichnis

- Arnold, G. (2017). Angewandte Quantensysteme – Die Technik des 21. Jahrhunderts. Graz: Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Physik
- Chown M.,(2013). Warum Gott doch würfelt, 3.Aufl.. München: Deutscher Taschenbuch Verlag. 2013.
- Desbalmes, C. (2016). Quantenphysik in der Schule- Phänomenologie und Mathematik (Diplomarbeit). Wien: Universität Wien
- Duit, R. & Glynn, S. (1995). Analogien- Brücken zum Verständnis. Naturwissenschaften im Unterricht. Physik 6 827), 4-10
- Duit, R. & Wodzinski, C. (2010). Piko-Brief Nr. 4 (Februar 2010).Merkmale guten Physikunterrichts. Kiel
- Dür, W. (2009). Quanteninformation – Ein Thema für den Schulunterricht, Praxis der Naturwissenschaften: Physik in der Schule 6/58, 12-21
- Dür, W.. (2010). Quanteninformationstheorie im Schulunterricht. Vortrag auf der Frühjahrstagung der Didaktik der Physik in Hannover.
- Homeister, M..(2022): Quantum Computing verstehen. Grundlagen-Anwendungen-Perspektiven. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Häußler, P.,Bünder, W., Duit, R. Gräber, W. & Mayer, J.. (1998). Naturwissenschaftsdidaktische Forschung – Perspektiven der Unterrichtspraxis. Kiel
- Kauertz, A. & Fischer, H.E..(2020). Aufgaben im Physikunterricht. In: Kircher E., Girwidz, R. Fischer,H.E.. Physikdidaktik. Grundlagen (427-456). Heidelberg: Springer-Verlag
- Kircher, E. (1995). Studien zur Physikdidaktik: Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen. ZUgl.: Habil.Schr (IPN 145). Kiel.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P..(2015).Physikdidaktik. Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- Kircher, E. & Girwidz, R..(2020a). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In: Kircher E., Girwidz, R. Fischer,H.E.. Physikdidaktik. Grundlagen (155-198). Heidelberg: Springer-Verlag
- Kircher, E. & Girwidz R..(2020b). Ziele und Kompetenzen im Physikunterricht. In: Kircher E., Girwidz, R. Fischer,H.E.. Physikdidaktik. Grundlagen (155-198). Heidelberg: Springer-Verlag
- Krabbe, H. & Fischer H.E..(2020). Gestaltung von Unterricht. In: Kircher E., Girwidz, R. Fischer,H.E.. Physikdidaktik. Grundlagen (117-154).Heidelberg: Springer-Verlag
- Leisen, J..(2011) Methodenwerkzeuge. In: Hopf, N., Schecker, H., Hötteke, D., Wiesner, H.. Physikunterricht kompakt. Köln: Aulis Verlag
- Leisen, J..(2011). Kompetenzorientiert unterrichten. Fragen und Antworten zu kompetenzorientiertem Unterricht und einem entsprechenden Lehr-Lern-Modell. Unterricht Physik Nr. 123/124
- Lüth H.,(2009).Quantenphysik in der Nanowelt, Schrödingers Katze bei den Zwergen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Müller, R. & Wiesner, H.. (2009). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik.
- Müller, R. & Wilhelm, T..(2021): Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik. In: Wilhelm, T., Schecker, H., Hopf, M. Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (369-400). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- Niedersächsisches Kultusministerium (2017). Kerncurriculum für das Gymnasium- gymnasiale Oberstufe. Physik. Hannover
- Nielsen, M. A. & Chuang, I. L..(2010). Quantum Computation and Quantum Information. New York: Cambridge University Press
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister. (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Berlin: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020.

# Anhang

## Interviewtranskript Kurt-Schwitters Gymnasium Misburg

### 1. Situative Voraussetzungen

- Klassenkomposition - reiner Leistungskurs. Nur 3 Mädchen, der Rest Jungen, sehr durchwachsendes Niveau (wenige auf dreier Niveau) mit großer Heterogenität. 3 bis 4 leistungsstarke Schüler\*innen, aber auch einige, die im ungenügenden oder mangelhaften Bereich sind. Einige der leistungsschwachen Schüler\*innen fehlen häufig. Einige Schüler\*innen belegen Informatik.
- Klassenklima - lockere, keine angstvolle Atmosphäre, Niveau wird im regulären Unterricht trotzdem anspruchsvoll gehalten.
- Schule - Kurt-Schwitters Gymnasium in Misburg, Hannover. Allgemeinbildendes Gymnasium.
- Lehrplanvorgaben - Schule orientiert sich ganzheitlich an den Kriterien des KCs. Keine eigenen Wahlpflichtthemen in der gymnasialen Oberstufe im Fach Physik.
- Stellung der Stunde in einer Unterrichtseinheit – vorangegangener Themenschwerpunkt ist der Doppelspalt und Gitter. Noch kein Bezug zur Quantenphysik. Der Themenübergang erfolgt erst nach den Sommerferien mit der Thematik gequantelter Energiewerte.

### 2. Individuelle Voraussetzungen

- Motivation – teilweise wenig intrinsische Motivation, einige Schüler\*innen interessieren sich für technische, physikalische und naturwissenschaftliche Themen.
- Lern- und Arbeitsverhalten – entspannte Arbeitsatmosphäre. Gruppenarbeiten sind weitestgehend problemlos möglich. Die Schüler\*innen sind in der Lage, Aufgaben eigenständig sorgfältig zu lösen.
- Psychomotorische Voraussetzungen – die affektiven Lernvoraussetzungen sind in der Lerngruppe gegeben.
- Interesse – 9 Schüler\*innen belegen Informatik als Fach in der gymnasialen Oberstufe und haben damit Vorwissen und ein gewisses Interesse an technischen Themen.

### 3. Einschätzung des Vorwissens (aus schulischem Hintergrund)

Mathematische Grundlagen:

- Vektorschreibweise – wurde bereits im Mathematikunterricht behandelt. Die Grundlagen und die allgemeine Darstellungsform sollten allen Schüler\*innen bekannt sein. Auch die Anwendung und der Umgang mit zweidimensionalen Vektoren sollte kein Problem darstellen.

- Vektordarstellung in Form von Pfeilen – im Physikunterricht wurden Probleme bereits mit Kraftpfeilen oder der Zeigerdarstellung visualisiert und gelöst. Die eigenständige Anwendung und Transformation stellen die meisten Schüler\*innen allerdings vor größere Probleme.
- Vektorrechnung (Vektoraddition und -multiplikation) – kaum Vorwissen vorhanden. Das Thema wurde im Mathematikunterricht nur kurz angerissen. Eigenständige Vektorrechnung ist nur auf sehr grundlegendem Niveau möglich.
- Formell korrekte Angabe von Wahrscheinlichkeiten (Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, ...) – wurde auf jeden Fall im Mathematikunterricht behandelt. Ein Großteil der Schüler\*innen sollte Wahrscheinlichkeiten korrekt angeben können.
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen – kaum Vorkenntnisse bei den Schüler\*innen zu erwarten. Häufig haben Schüler\*innen im Matheunterricht in diesem Themenfeld größere Verständnisprobleme.

#### Physikalische Grundlagen

- Atomvorstellungen (Kern mit Protonen und Hülle mit Elektronen) – wurde vermutlich in Chemie behandelt.
- Schalenmodell (Hüllenelektronen auf verschiedenen Energieniveaus) – ebenfalls Thema des Chemieunterrichts in der Mittelstufe. Energieniveaus kommen in Physik erst nach den Herbstferien dran.
- Gequantelte Energiewerte – Inhalte und Experimente zu gequantelten Energiewerten wurden noch nicht thematisiert, keine Vorkenntnisse.
- Physikalische Phänomene des Doppelspaltversuchs – Versuche Doppelspalt und Phänomene am Gitter wurden in den vorangegangenen Stunden durchgeführt.

#### Quantenmechanische Grundlagen

- Funktionsweise eines herkömmlichen Computers – die Schüler\*innen, die Informatik belegen, könnten hier einiges an Vorwissen mitbringen. Bei den anderen Schüler\*innen würde dies ausschließlich aus außerschulischem Interesse gegeben sein.
- Definition und Anwendung von Bits – Wird nicht im Schulunterricht thematisiert, Vorwissen ist nicht vorauszusetzen.
- Definition von Zuständen (beispielsweise 0 und 1) – Wird nicht im Schulunterricht thematisiert, Vorwissen ist nicht vorauszusetzen.
- Der probabilistische Charakter von Zuständen - Wird nicht im Schulunterricht thematisiert, Vorwissen ist nicht vorauszusetzen.
- Benutzung von Programmiersprache - Die Schüler\*innen, die Informatik belegen, könnten hier einiges an Vorwissen mitbringen. Bei den anderen Schüler\*innen würde dies ausschließlich aus außerschulischem Interesse gegeben sein.

# Interviewtranskript Ricarda-Huch-Schule Hannover

## 1. Situative Voraussetzungen

- Klassenkomposition- Reiner Leistungskurs. 3 Mädchen und 10 Jungen. Der Kurs besteht aus einigen sehr leistungsstarken Schüler\*innen, aber auch einigen Schüler\*innen (2-3 Schüler\*innen), die im ungenügenden oder mangelhaften Bereich sind. Einige belegen Informatik.
- Klassenklima – gutes Unterrichtsklima, die Schüler\*innen sind begeisterungsfähig und arbeiten sehr selbstständig, gerne in Gruppenarbeit.
- Schule – Ricarda-Huch-Schule Hannover. Allgemeinbildendes Gymnasium.
- Lehrplanvorgaben - Schule orientiert sich ganzheitlich an den Kriterien des KCs. Keine eigenen Wahlpflichtthemen in der gymnasialen Oberstufe im Fach Physik
- Stellung der Stunde in einer Unterrichtseinheit – kein direkter Bezug zu der aktuellen Unterrichtseinheit.

## 2. Individuelle Voraussetzungen

- Motivation und Interesse – einige Schüler\*innen interessieren sich für technische, physikalische und naturwissenschaftliche Themen. Zwei Schüler\*innen nahmen an dem Projekt „Einsteins Enkelinnen“ teil. Einige Jungs der Lerngruppe sind Veranstaltungstechniker an der Schule und kennen sich deshalb mit Technik aus.
- Lern- und Arbeitsverhalten – die Schüler\*innen sind in der Lage, Aufgaben eigenständig sorgfältig zu lösen. Sie können sich für neue, aber auch etwas komplexere Themen gut begeistern.
- Psychomotorische Voraussetzungen – die affektiven Lernvoraussetzungen sind in der Lerngruppe gegeben.
- Interesse – 2 Schüler\*innen belegen Informatik als Fach in der gymnasialen Oberstufe und haben damit Vorwissen und ein gewisses Interesse an technischen Themen.

## 3. Einschätzung des Vorwissens (aus schulischem Hintergrund)

Mathematische Grundlagen:

- Die Schüler\*innen der Lerngruppe sind mathematisch eher fit
- Vektorschreibweise – Vektoren sind bekannt aus dem Mathematikunterricht in den Jahrgängen 9 und 10. Die Anwendung und der Umgang mit zweidimensionalen Vektoren sollten kein Problem darstellen.
- Vektordarstellung in Form von Pfeilen – im Physikunterricht wurden Probleme bereits mit der Zeigerdarstellung visualisiert und gelöst.
- Einheitskreis- bekannt aus Klasse 10 aber nicht im physikalischen Kontext.

- Formell korrekte Angabe von Wahrscheinlichkeiten (Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, ...) – Grundlagen aus der Mittelstufe Mathematik. Ein Großteil der Schüler\*innen sollte Wahrscheinlichkeiten korrekt angeben können.
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen – kaum Vorkenntnisse bei den Schüler\*innen zu erwarten.

#### Physikalische Grundlagen

- Atomvorstellungen (Kern mit Protonen und Hülle mit Elektronen) – Stand aus Klasse 9 und 10.
- Schalenmodell (Hüllenelektronen auf verschiedenen Energieniveaus) – Das Schalenmodell und die Energieniveaus werden erst im dritten Halbjahr behandelt.
- Gequantelte Energiewerte – Quanten wurden bereits thematisiert.  $E = h \cdot f$  als Energie eines Photons bekannt. Die Schüler\*innen wissen, dass es kleinste Energieportionen gibt.
- Physikalische Phänomene des Doppelspaltversuchs – ausführlich behandelt, da abiturrelevant.
- Zusätzlich wurde bereits der Welle-Teilchen-Dualismus und die Grundlagen von Verschränkung im Physikunterricht behandelt.

#### Quantenmechanische Grundlagen

- Funktionsweise eines herkömmlichen Computers – die Schüler\*innen, die Informatik belegen, könnten hier einiges an Vorwissen mitbringen. Bei den anderen Schüler\*innen würde dies ausschließlich aus außerschulischem Interesse gegeben sein.
- Definition und Anwendung von Bits – Bits sind aus dem Schulkontext noch nicht bekannt.
- Definition von Zuständen (beispielsweise 0 und 1) – wird nicht im Schulunterricht thematisiert, Vorwissen ist nicht vorauszusetzen.
- Der probabilistische Charakter von Zuständen - wird nicht im Schulunterricht thematisiert, Vorwissen ist nicht vorauszusetzen.
- Benutzung von Programmiersprache - Die Schüler\*innen, die Informatik belegen, könnten hier einiges an Vorwissen mitbringen. Bei den anderen Schüler\*innen würde dies ausschließlich aus außerschulischem Interesse gegeben sein.

# Interviewtranskript Leibniz Schule Hannover

## 1. Situative Voraussetzungen

- Klassenkomposition – reiner Leistungskurs 17 Schüler\*innen, 5 weiblich und 12 männlich.
- Klassenklima – witzig, lockere Atmosphäre, können auch gut arbeiten, teilweise etwas langsam bei selbstständigem Bearbeiten von verschiedenen Aufgaben.
- Sehr starke Schüler\*innen auf versch. Ebenen 1/3 sehr stark, 1/3 gut, 1/3 befriedigend. 2 Schüler\*innen belegen Informatik, viele haben Chemie als LK. Insgesamt relativ leistungshomogene Gruppe auf gutem Unterrichtsniveau.
- Schule – Leibniz Schule Hannover. Allgemeinbildendes Gymnasium.

Stellung der Stunde in einer Unterrichtseinheit – die Lerngruppe thematisiert im regulären Physikunterricht aktuell Schwingungen und Wellen und Interferenz. Es wurden zwei Quellen betrachtet, die interferiert haben.

## 2. Individuelle Voraussetzungen

- Motivation und Interesse – viele Schüler\*innen lassen sich für verschiedenste naturwissenschaftliche Themen begeistern.
- Lern- und Arbeitsverhalten – die meisten Schüler\*innen beteiligen sich aktiv am Unterricht und können gut selbstständig gründlich Aufgaben bewältigen.

## 3. Einschätzung des Vorwissens (aus schulischem Hintergrund)

Mathematische Grundlagen:

- Vektorschreibweise – Kräftepfeile kamen sowohl in Physik als auch in Mathematik vor.
- Vektordarstellung in Form von Pfeilen – bei zweidimensionaler Darstellung haben die Schüler\*innen kein Problem im Umgang mit dieser Darstellungsform.
- Vektorrechnung (Vektoraddition und -multiplikation) – kam im Mathematikunterricht vor.
- Formell korrekte Angabe von Wahrscheinlichkeiten (Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, ...) – wurde im Mathematikunterricht behandelt. Der genaue Wissensstand ist nicht bekannt.

Physikalische Grundlagen

- Atomvorstellungen (Kern mit Protonen und Hülle mit Elektronen) – Rutherford'sches Atommodell ist der aktuelle Stand der thematisch behandelt wurde.
- Schalenmodell (Hüllenelektronen auf verschiedenen Energieniveaus) – wurde im Chemieunterricht thematisiert ohne Bezug zur Physik.
- Gequantelte Energiewerte – durch die Coronapandemie besitzen die Schüler\*innen in diesem Themengebiet wahrscheinlich eher wenig Vorwissen.
- Physikalische Phänomene des Doppelspaltversuchs – wurde noch nicht behandelt.



- Einheitskreis mit Pfeildarstellung im physikalischen Kontext.

#### Quantenmechanische Grundlagen

- Grundlagen im Bereich der Quantenmechanik wurden im Schulkontext nicht behandelt. Auch der Physikunterricht war bis zu diesem Zeitpunkt unberührt davon, weshalb kein Vorwissen vorausgesetzt werden kann. Lediglich aus außerschulischem Interesse können einige Schüler\*innen sich bereits mit dem Thema beschäftigt haben.

## Beobachtungsnotizen zur Durchführung am Kurt-Schwitters Gymnasium Misburg

- Technische Anfangsprobleme sorgten für immensen Zeitverlust. Erforderliches Ausweichen auf den Computerraum, da eine Anmeldung mit Schultablets nicht möglich war. Zudem konnten mit einem Google Account nur 5 Dokumente gleichzeitig geöffnet werden, was dazu führte, dass die Gruppen nur jeweils ein Notebook zur Verfügung haben.
- Aufgrund der technischen Probleme wurde der Einstieg zeitlich gekürzt.
- Die Gruppen wurden von den Schüler\*innen selbstständig gebildet. Dadurch entstand eine große Heterogenität zwischen den Gruppen. Für eine Gruppe, die aus Informatikinteressierten bestand, ist der Inhalt teilweise zu basal.
- Die Informationstexte sind teilweise zu lang. Die Schüler\*innen können sich nicht ausreichend konzentrieren und motivieren, die langen Texte zu lesen.
- Einige Gruppen lassen sich schnell durch unterrichtsfremde Dinge, teilweise auf den Computern, ablenken.
- Die Gruppendynamik und die Gruppendiskussionen waren teilweise etwas kurz und wenig zielführend.
- Die Gruppen haben sich relativ schnell durch die ersten beiden grundlegenden Themenbereiche geklickt, ohne sich tiefgründig mit dem Lerngegenstand zu beschäftigen.
- Vertiefende Frage für leistungsstarke Schüler\*innen von den Lehrpersonen: Weshalb können Quantencomputer Probleme schneller lösen oder Berechnungen schneller ausführen als klassische Computer?

Hier gab es fachliche Antworten von vier Schüler\*innen.

Antworten: Aufgrund der Vielfalt der Zustände in den Qubits, Beschränkung auf Qubits.

Input von der Lehrperson: Qubits müssen trotzdem über Bits gespeichert werden. Aber trotzdem sind vielfältigere Rechen- und Speicheroptionen möglich.

- Rückfrage bei der Thematisierung von Routenoptimierung: Können Quantencomputer Routen auch besser berechnen?
- Bei der Zusammenfassung merkte man das steigende Interesse bei den Schüler\*innen, wenn es um praktische Anwendungsgebiete ging. Hier waren viele Schüler\*innen am Plenumsgespräch beteiligt.

## **Beobachtungsnotizen zur Durchführung an der Ricarda-Huch-Schule Hannover**

- Insgesamt nur 12 Teilnehmer\*innen, 2 Einwilligungen zur Befragung fehlen.
- Die technischen Anweisungen zum Jupyter Notebook und der Anmeldung wurden erst nach der Präsentation durchgeführt.
- Zu Beginn der Stunde wurde die Gliederung der Stunde klar kommuniziert.
- Die Schüler\*innen bekommen alle ihr eigenes Notebook. Dies ist durch mehrere Google Accounts möglich.
- Die Gruppenarbeit erfolgt in Gruppen aus drei Schüler\*innen.
- Die Probefragen und Probezellen des Notebooks wurden gemeinsam durchgegangen und ausgeführt. Alle Schüler\*innen haben die Umgangsweise mit dem Notebook in den Grundlagen verstanden und konnten mit den Aufgaben beginnen.
- Die Themenbereiche sollen abschnittsweise durchgegangen werden. Ungefähr 20 Minuten Bearbeitungszeit für die ersten beiden Themenbereiche.
- Die Gruppen arbeiten sehr konzentriert und selbstständig. Kaum Hilfestellung, Arbeitsanleitungen oder Anregungen in der Gruppenarbeit notwendig.
- Es wurde eine Pause von fünf Minuten nach den ersten beiden Themenbereichen gemacht. Danach 25 Minuten Arbeitszeit für die restlichen Themen.
- Viele Schüler\*innen sind interessiert daran, wie Computer und Quantencomputer funktionieren.
- Für Schüler\*innen, die die Aufgaben bereits abgeschlossen haben, wurde die Abschlussfrage zur Diskussion formuliert: Wie kann nun mit Quantencomputern ein verbesserter Rechenprozess umgesetzt werden. Viele Schüler\*innen beteiligten sich an der Beantwortung der Frage im Plenum. Die richtige fachwissenschaftliche Antwort wurde aber abschließend nochmal von der Lehrperson formuliert.
- Zwischenfragen gab es vor allem beim Hadamard Gatter.

## Beobachtungsnotizen zur Durchführung an der Leibniz Schule Hannover

- Die Gruppen arbeiten meist an mehreren Geräten. Die Anfangszellen und Testfragen wurden gemeinsam ausgeführt, sodass alle Schüler\*innen mit dem Notebook umgehen können.
- Bearbeitung in Blöcken. Die ersten beiden Themen in 20 Minuten und 30 Minuten für die restlichen Themen.
- Weiterführende Frage von den leistungsstarken Gruppen -> Zwischenfrage, die im Plenum besprochen wurde. Frage: Warum stellen wir einen zweidimensionalen Vektor auf einer Kugel da? Reicht da nicht der Einheitskreis?  
Antwort vom Referenten: Faktor bei der Superposition gibt zusätzlich eine Phasenverschiebung an, die zur Vereinfachung rausgenommen wurde und weitere Positionen auf einer Kugel ermöglicht.  
Veranschaulichung per JAVAexpert als Animation  
Nachfrage zum Faktor: Faktor nur bei  $|1\rangle$  oder auch bei  $|0\rangle$ ?
- Zeittechnisch gute Umsetzung. Abschließend 10 Minuten für den Themenbereich Wahrscheinlichkeiten.
- Alle Gruppen arbeiten konzentriert an den Notebooks in Dreier- und Vierergruppen
- Zwei Gruppen haben bereits sehr gute Vorkenntnisse im Bereich der Informatik. Es besteht ein reges Interesse an der Thematik. Die meisten Schüler\*innen beschäftigen sich tiefgründig mit den Lerninhalten. Für alle Leistungsstände gibt es besonders angepasste Bereiche. Die leistungsstarken Schüler\*innen beschäftigen sich vor allem mit den beiden letzten Themenbereichen. Die ersten Teile waren für sie recht einfach zu bearbeiten. Die leistungsschwächeren Gruppen halten sich relativ lange an den ersten einfachen Themenbereichen auf.
- Die Leistungsheterogenität ist in dieser Lerngruppe nicht so stark ausgeprägt, was die Gruppenzusammensetzung vereinfacht hat und für keine Probleme sorgte.
- Die Zusammenführung wurde etwas ausführlicher gestaltet. Auch hier wieder abschließend die Diskussionsfrage, wie Quantencomputer schneller funktionieren. Hier gab es im Plenum keine Rückmeldung.
- Zwischenfrage: Warum gibt es eine Wurzel 2 im Vorfaktor?  
Antwort: Braucht man mathematisch als Vorfaktor. Inhaltlich klärt sich das später
- Viele Schüler\*innen konnten die Lernziele erreichen.

## Auswertung der Schüler\*innenbefragung

Frage 13. Wie viele Zustände kann ein Bit annehmen? (Freie Textfrage)

<1/1> 2  
<2/2> 8  
<3/4> 2  
<4/5> 2  
<5/6> 2  
<6/7> 2  
<7/8> 2  
<8/9> 2  
<9/10> 2  
<10/11> 2  
<11/12> 2  
<12/13> 2  
<13/14> 2  
<14/15> 2  
<15/16> 2  
<16/17> 2  
<17/18> 2  
<18/19> Ein Bit kann zwei Zustände annehmen, 0 und 1  
<19/20> zwei, 0 und 1  
<20/21> 2  
<21/22> zwei  
<22/23> 2  
<23/24> zwei  
<24/25> zwei verschiedene 0 oder 1  
<25/26> 2  
<26/27> 0 ode 1  
<27/28> 0 oder 1  
<28/29> 2  
<29/30> zwei  
<30/31> 0 und 1  
<31/32> 2  
<32/33> 2  
<33/34> 2  
<34/35> 2  
<35/36> 2  
<36/37> Zwei 0 oder 1  
<37/38> 2  
<38/39> 2  
<39/40> 2  
<40/41> 2  
<41/42> 2  
<42/43> 2  
<43/44> 2  
<44/45> 0 und 1  
<45/46> 2  
<46/47> 2

### Frage 15. Nenne einen Unterschied zwischen Bit und Qubit (Freie Textfrage)

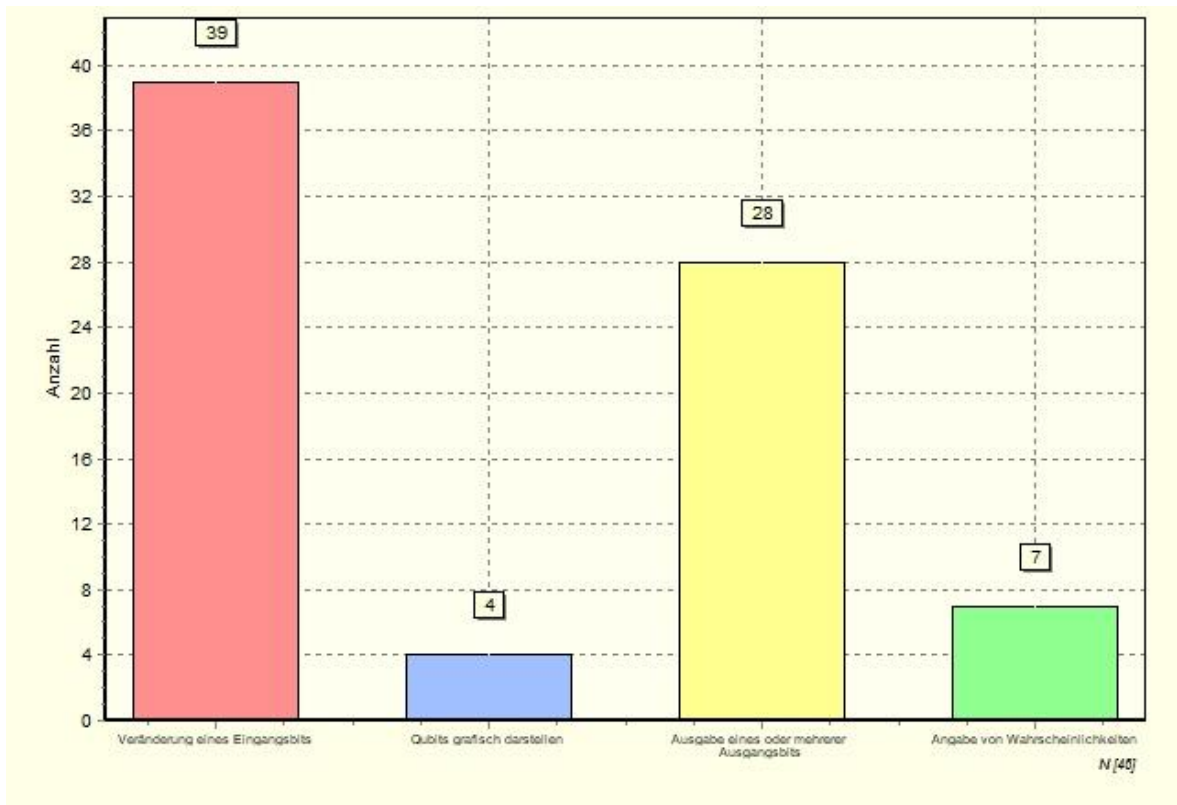
- <1/1> Ein Qubit kann mehr als zwei Zustände annehmen
- <2/2> Qubit hat auch Zustände zwischen 0 und 1
- <3/4> Ein Qubit kann Zwischenzustände besitzen
- <4/5> Das Qubit kann auch zwischen 0 und 1 arbeiten
- <5/6> Die Anzahl der Zustände
- <6/7> Bit kann nur 0 oder 1 sein, während ein Qubit Zustände dazwischen und beide Zustände gleichzeitig einnehmen kann
- <8/9> Bit kann nur 0 und 1 darstellen, dagegen kann ein Qubit auch alle anderen Zustände dazwischen darstellen
- <9/10> Qubits können 0 und 1 gleichzeitig annehmen z.B. 0,1 oder 0,163
- <10/11> Qubit hat mehrere Zustände als ein Bit
- <11/12> Qubit ist Leistungsstärker
- <12/13> Qubit ist leistungsstärker
- <13/14> Qubit hat Zwischenzustände und Bit nicht
- <14/15> Bit= Lichtschalter, Qubit= Dimmer
- <15/16> Bit=Lichtschalter, Qubit=Dimmer
- <16/17> Ein Qubit hat mehr als 2 mögliche Zustände
- <17/18> Ein Qubit kann unendlich viele Zustände zwischen 0 und 1 annehmen
- <18/19> Qubits können auch Überlagerungszustände annehmen. Also nicht nur 0 oder 1, sondern zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit 0 und zur Gegenwahrscheinlichkeit 1
- <19/20> Das Qubit kann mehr als zwei Zustände besitzen
- <20/21> Ein Bit kann 2 Zustände annehmen. Ein Qubit kann zusätzlich nahezu unendlich Übergangszustände annehmen.
- <21/22> Der Bit ist entweder 0 oder 1, während über den Qubit nur gesagt werden kann mit welcher Wahrscheinlichkeiten 0 oder 1 ist. Er kann sich in Überlagerungszuständen befinden.
- <22/23> Bit:nur zwei Zustände 0 oder 1  
Qubit: unendlich viele Zustände von 0 bis 1
- <23/24> Qubits können mehr als zwei Zustände haben. Überlagerungszustände
- <24/25>
- <25/26> Qubits können unendlich viele Zustände annehmen, Bits nur 2
- <26/27> Modell Kreis vs. Kugel  
0 oder 1, alles dazwischen
- <27/28> Ein Qubit hat keinen festen Zustand. Nur zum Messzeitpunkt legt er sich fest
- <28/29> Bit 2 Zustände, Qubit nahezu unendlich
- <29/30> Qubits können auch Zustände zwischen 1 und 0 annehmen
- <30/31> Ein Qubit kann auch einen Zustand zwischen 0 und 1 haben (Superposition)
- <31/32> 2 vs. theoretisch unendlich Zustände
- <32/33> Die mögliche Anzahl der Zustände 2 vs. unendlich
- <33/34> Ein Bit hat nur 2 Zustände während ein Qubit unendlich hat
- <34/35> Bit hat nur zwei Zustände, Qubit beliebig viele
- <35/36> Ein Bit hat 2 Zustände, ein Qubit nahezu unendlich viele Zustände annehmen
- <36/37> Überlagerung von Zuständen bei Qubit möglich
- <37/38> Ein Qubit hat mehr Zustände
- <38/39> Die Zustände
- <39/40> Wubit kann auch Zustände zwischen 0 und 1 annehmen, während Bits nur 0 oder 1 annehmen können
- <40/41> Ein Qubit kann unendlich viele Zustände annehmen
- <41/42> Qubits können im Gegensatz zu Bits nahezu unendlich viele Zustände einnehmen

<42/43> Ein Qubit kann mehrere Zustände zwischen 0 und 1 annehmen, ein Bit kann nur die Zustände 0 und 1 annehmen  
<43/44> Ein Qubit kann mehr Zustände annehmen  
<44/45> Im Gegensatz zum Bit kann ein Qubit Zustände zwischen 0 und 1 annehmen, bspw. 0,5 oder 0,7  
<45/46> Qubit kann Zustände zwischen 0/1 einnehmen  
<46/47> Bit 1/0 Qubit kann zwischen 0 und 1 mehr möglich

**Frage 16. Wie viele Zustände kann ein Qubit annehmen? (Freie Textfrage)**

<1/1> unendlich  
<2/2> unendlich  
<3/4> unendlich  
<4/5> unendlich  
<5/6> Nahezu unendlich viele  
<6/7> unendlich  
<7/8> unendlich  
<8/9> unendlich  
<9/10> nahezu unendlich  
<10/11> nahe zu unendlich viele  
<11/12> nahezu unendlich  
<13/14> nahezu unendlich  
<14/15> unendlich  
<15/16> unendlich  
<16/17> nahezu unendlich  
<17/18> unendlich  
<18/19> unendlich viele  
<19/20> nahezu unendlich  
<20/21> nahezu unendlich  
<21/22> nahezu unendlich  
<22/23> unendlich  
<23/24> unendlich  
<24/25> fast unendlich  
<25/26> nahe zu unendlich  
<26/27> alles zwischen 0 und 1  
<27/28> Ket 0, Ket 1 oder dazwischen  
<28/29> nahezu unendlich  
<29/30> unendlich viele  
<30/31> unendlich  
<31/32> unendlich  
<32/33> unendlich  
<33/34> unendlich  
<34/35> beliebig viele  
<35/36> unendlich  
<36/37> nahezu unendlich viele  
<37/38> so viel wie benötigt  
<38/39> nahezu unendlich  
<39/40> nahezu unendlich  
<40/41> unendlich viele  
<41/42> fast unendlich viele Zustände  
<42/43> unendlich viele  
<43/44> unendlich  
<44/45> unendlich viele  
<45/46> unendlich  
<46/47> unendlich viele

Frage 17. Welche Funktionen erfüllen die Quantengatter für Qubits? (Multiple Choice Frage)



Frage 18. Wie kann der Zustand eines Qubits dargestellt werden? (Freie Textfrage)

- <1/1> Ket- Bra Schreibweise
- <2/2> Blochkugel
- <3/4> Blochkugel
- <5/6> Ket-Bra Schreibweise
- <8/9> Ket-Bra Schreibweise
- <9/10> Durch einen zweidimensionalen Spaltenvektor
- <10/11> Blochkugel
- <13/14> Blochkugel
- <16/17> Ket-Bra Schreibweise und als Vektor in einer Kugel
- <17/18> In einer Kugel
- <18/19> Blochkugel
- <19/20>
- <20/21> Vektoren in einem kugelförmigen Koordinatensystem
- <21/22> Auf einer Bloch-spehe in Form eines Vektors
- <22/23> grafisch
- <23/24> Mit einer Einheitskugel
- <24/25> Kugel mit 3D Koordinaten
- <25/26> In einer Kugel als Vektor in eine Richtung
- <27/28> Histogramm oder mit Psi
- <28/29> Ket-Bra Schreibweise
- <29/30> Mit der Blochkugel
- <30/31> Durch einen Vektor in einer Einheitskugel bzw durch eine komplexe Zahl
- <31/32> Ket-Bra- Schreibweise
- <32/33> Ket-Bra- Schreibweise

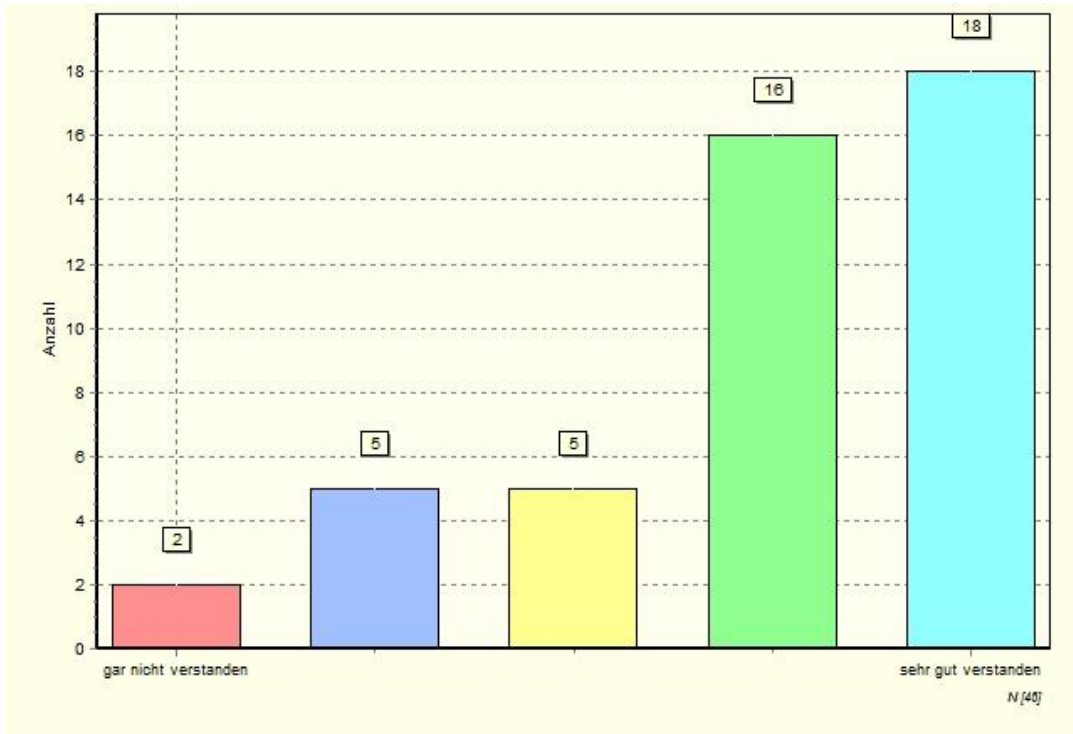


<33/34> Ket-Bra Schreibweise  
 <34/35> Ket-Bra Schreibweise, Blochkugel  
 <35/36> Ket-Bra Schreibweise  
 <36/37> Blochkugel (dreidimensionales Koordinatensystem)  
 <37/38> Histogramm  
 <38/39> Histogramm  
 <39/40> Auf der Oberfläche einer Kugel mithilfe von Vektoren  
 <40/41> Es kann eine Gewichtung von  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  dargestellt werden.  
 <41/42> Durch die Lage auf der Oberfläche einer Kugel  
 <42/43> Durch Quantengatter oder Schaltkreise  
 <43/44> in einer Kugel  
 <44/45> Wahrscheinlichkeit  
 <45/46> in Wahrscheinlichkeiten für  $|1\rangle$  und  $|0\rangle$   
 <46/47> Ket-Bra Schreibweise

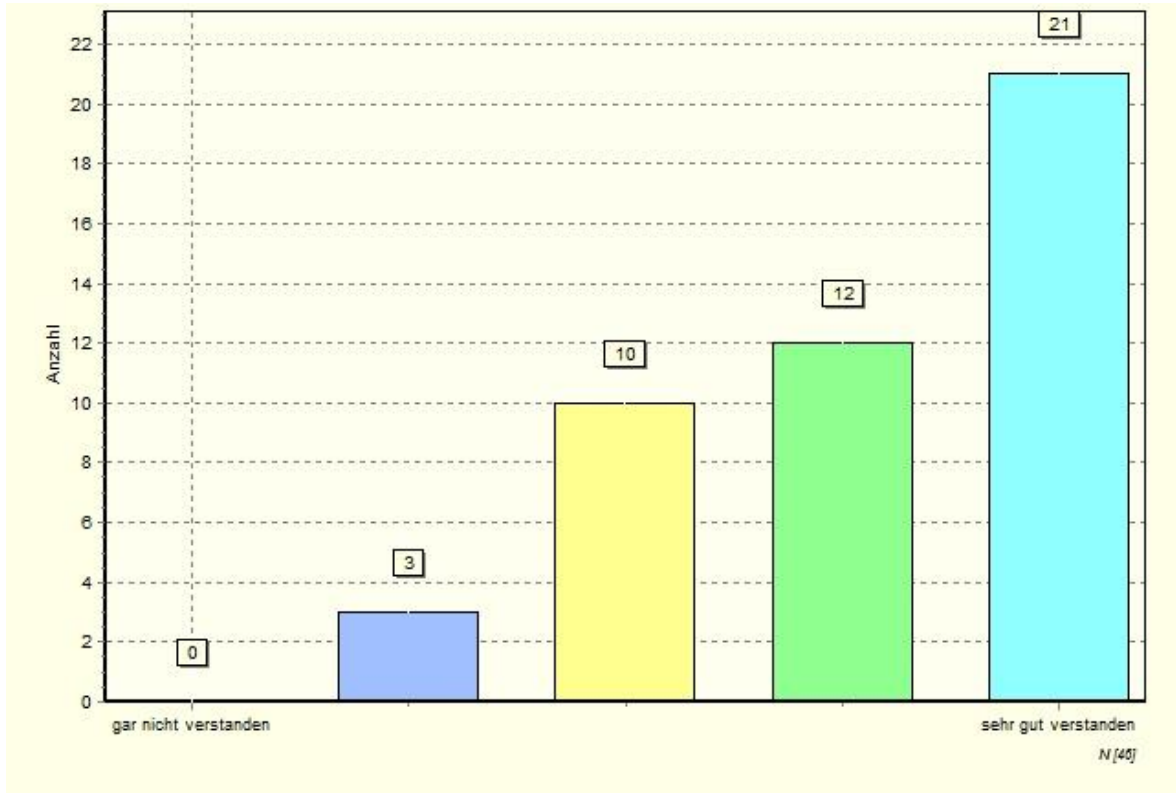
## Frage 20. Was für eine Aussage hat der Messprozess in der Quantenmechanik?

<1/1> Begrenzte Aussage, eher eine Vorhersage aufgrund von Heisenberg'scher Unschärferelation  
 <5/6> Begrenzte Aussage  
 <8/9> Es kann eine Vorhersage von Informationen geben  
 <16/17> Die Wahrscheinlichkeiten der Werte  
 <17/18> Gibt Wahrscheinlichkeiten an  
 <18/19> Mit der Messung wird der Zustand eines Qubits eingeloggt. Vor der Messung befindet sich ein Qubit in einem Überlagerungszustand und erst mit der Messung ist der Zustand festgelegt  
 <20/21> er zeigt einen Quant aus einem Überlagerungszustand. Der genaue Ort wird festgelegt  
 <21/22> er lässt den Überlagerungszustand zu einem bestimmten Wert kollabieren. Es kann nur 1 oder 0 gemessen werden.  
 <23/24> Gibt Wahrscheinlichkeiten an.  
 <24/25> Welcher Zustand der Quant hat 1 oder 0 oder dazwischen  
 <25/26> Wie viel % 0 und wie viel 1  
 <26/27> Bedingt anhand von Wahrscheinlichkeiten  
 <27/28> Über den Zustand am Messzeitpunkt aber nicht vorher  
 <28/29> Man misst den Qubit und misst 0 oder 1  
 <30/31> Auf Basis der Wahrscheinlichkeiten für 0 und 1 wird ein Wert von entweder 0 oder 1 ermittelt  
 <31/32>  
 <32/33>  
 <34/35> Er misst entweder den  $|0\rangle$  Zustand oder  $|1\rangle$ , bei wiederholter Messung kann eine Wahrscheinlichkeit zum Erreichen der beiden bestimmt werden  
 <36/37> Erst nach der Messung hat ein Qubit ein festen Wert vorher nur Wahrscheinlichkeiten  
 <39/40> Es können Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ergebnisse ausgegeben werden  
 <40/41> Angabe von verschiedenen Wahrscheinlichkeiten  
 <41/42> Er hat keine eindeutige Aussage, sondern kann nur Wahrscheinlichkeiten berechnen  
 <43/44> Er gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der sich das Qubit beim Messprozess in diesem Zustand begibt.  
 <46/47> Wahrscheinlichkeitsangabe

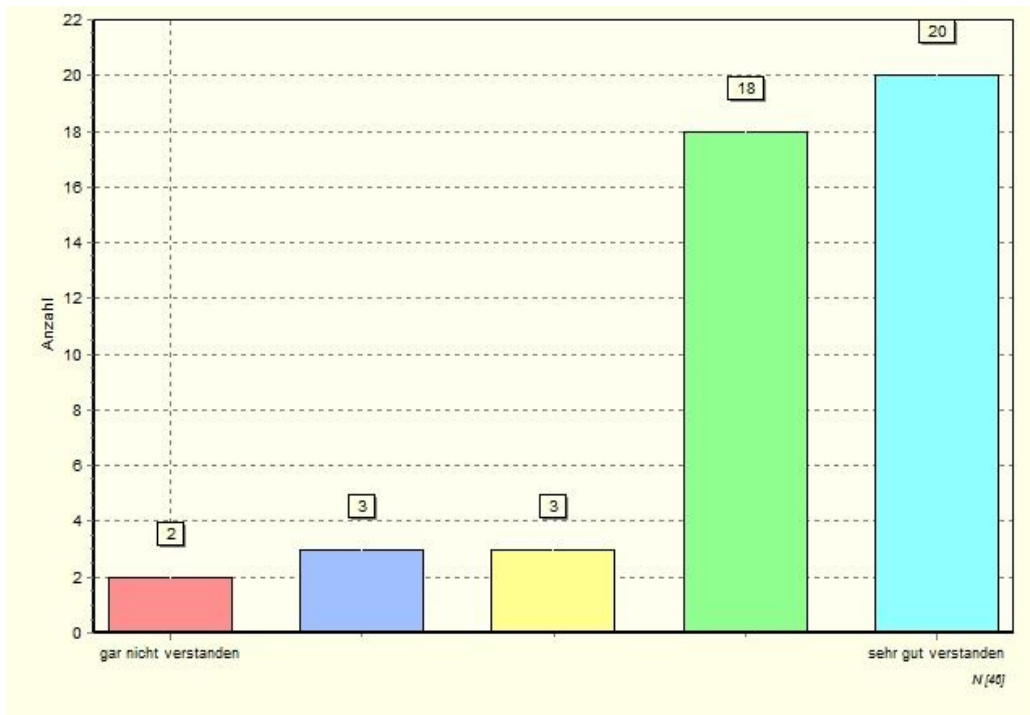
Frage 23. Ich habe verstanden, was Qubits sind und kenne ihre Eigenschaften (Skalenfrage)



Frage 25. Ich habe verstanden, was der Vorteil von quantenmechanischen Systemen und Qubits ist (Skalenfrage)



Frage 26. Ich habe verstanden, dass quantenmechanische Messungen nur Vorhersagen über den Zustand eines Qubits liefern (Skalenfrage)



## Verlaufsplan

Zeit	Phase/Lernziele	Unterrichtsinhalte	Organisation/Didaktische Hinweise	Medien/Materialien
5 min	Begrüßung	Die Studierenden stellen sich und das Projekt kurz vor. Der Ablauf der Stunde wird den Schüler*innen transparent mitgeteilt. Alle Teilnehmenden bekommen ein digitales Gerät in Form eines Tablets oder Computers Der Forschungsgegenstand Quantencomputer wird kurz vorgestellt	Die erstellte PPP begleitet die Begrüßung. Hier wird bereits das Thema der Stunde benannt, gezeigt wird ein Bild von einem Quantencomputer  Die Begrüßung findet im Plenum statt	PPP Folie 1
5 min	Theoretischer Einstieg	Einstieg über Elemente der klassischen Informationstechnologie Als Aufhänger wird die Geschichte der digitalen Technik vorgestellt.  Danach wird kurz auf die Funktionsweise aktueller Techniken mit besonderem Augenmerk auf die Kommunikation über Bits eingegangen	PPP gestützte Präsentation durch die Studierenden  Die Einführung in die Funktionsweise erfolgt sehr oberflächlich  Bewusste Gegenüberstellung von klassischer und	PPP Folie 2 bis Folie 10

Zeit	Phase/Lernziele	Unterrichtsinhalte	Organisation/Didaktische Hinweise	Medien/Materialien
		Vorstellung der Definition und Charaktereigenschaften von Bits und Qubits	quantenmechanischer Informationsverarbeitung  Als Zustandsdarstellung dienen Kreis bzw. Blochkugel Analogie zu Lichtschalter vs. Dimmer	
5 min	Anmeldung und Einführung Jupyter Notebooks	Die Schüler*innen werden in Gruppen eingeteilt und bekommen individuelle Google Accounts, mit denen sie sich einzeln in verschiedene Notebooks einloggen können.  Nach der Anmeldung werden die Grundlagen im Umgang mit Jupyter Notebooks und die Möglichkeiten bei der Bearbeitung mit den Lernenden besprochen.	Einteilung in Gruppen von maximal 4 Schüler*innen  Es ist wichtig, dass alle Schüler*innen ein eigenes Gerät zur Verfügung haben. In ihren eigenen Notebooks können sie individuelle Einträge vornehmen  Das Ausführen der ersten beiden Zellen wird zusammen durchgeführt, um die Funktionalität zu gewährleisten	Digitale Geräte jeweils eins pro Schüler*in  Google Account pro Gruppe  Nummerierte Dokumente
55 min	Erarbeitungsphase  Bearbeitung des Jupyter Notebooks in Gruppenarbeit	Die Schüler*innen bekommen den offenen Arbeitsauftrag, das jupyter Notebook in der Gruppe durchzuarbeiten.	Bearbeitung in Gruppenarbeit	Digitale Geräte jeweils eins pro Schüler*in  Google Account pro Gruppe

Zeit	Phase/Lernziele	Unterrichtsinhalte	Organisation/Didaktische Hinweise	Medien/Materialien
		<p>Das Notebook besteht aus Informationstexten, Beispielanwendungen, Diskussionsfragen, Kurzfragen, Merkkästen und einem Abschlussquiz</p> <p>Es ist unterteilt in die Themenbereiche Bits vs. Qubit, logische Gatter vs Quantengatter, Zustandsänderungen, Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik.</p> <p>Die Themen werden nacheinander bearbeitet und bauen aufeinander auf</p> <p>Abschließend kann der Lernerfolg anhand des Quiz von den Schüler*innen selbst reflektiert werden</p>	<p>Bei Fragen stehen die Studierenden zur Verfügung.</p> <p>Die Studierenden kontrollieren immer wieder den Fortschritt der einzelnen Gruppen.</p> <p>Es werden Zeitslots für die Bearbeitung der einzelnen Bereiche grob vorgegeben</p> <p>Durch einstreuende Fragen soll versucht werden die Gruppendiskussionen anzuregen</p> <p>Gruppen, die bereits früher fertig sind, bekommen vertiefende Fragen gestellt, bei denen der Lerninhalt angewendet werden muss.</p>	<p>Nummerierte Dokumente</p>

Zeit	Phase/Lernziele	Unterrichtsinhalte	Organisation/Didaktische Hinweise	Medien/Materialien
10 min	Ergebnissicherung Zusammenfassung Ausblick	Nach der Bearbeitung wird das Gelernte noch einmal zusammengefasst. Es wird detailliert auf die Funktionsweise und die Vorteile von Quantencomputern eingegangen inklusive Ausblick in die Zukunft und die Möglichkeiten von Quantenrechnern eingegangen. Der Lerninhalt wird mit dem Anwendungsgebiet verknüpft	Die Ergebnissicherung erfolgt im Plenum  Verständnisprobleme werden durch offene Fragen beseitigt  Die Lernziele müssen angesprochen werden Der Ausblick soll das Interesse der Schüler*innen für das Thema weiter befeuern	PPP
10 min	Schüler*innenbefragung	Um die Lernwirksamkeit der Stunde bewerten zu können, füllen die Schüler*innen einen kurzen Fragebogen aus. Dieser beinhaltet Fragen zum Vorwissen, Inhaltsfragen und die Möglichkeit der Bewertung sowie des Feedbacks	Die Befragung erfolgt nach Genehmigung und nach Einholen des Einverständnisses von den Schüler*innen bzw. deren Erziehungsberechtigten	Fragebögen