

**Planung und Durchführung  
eines Quantenphysikkurses im PhotonLab  
für die 10. Jahrgangsstufe  
des bayrischen Gymnasiums**

Wissenschaftliche Hausarbeit  
zur Ersten Lehramtsprüfung für das Lehramt an  
Gymnasien nach der LPO I

Hack, Julia Andrea Elisa

Erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien in Bayern

Ludwig-Maximilians-Universität München  
Didaktik der Physik

München, 07.05.2018



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	i
1 Einleitung .....	1
2 Methoden.....	4
2.1 Theoretischer Teil .....	4
2.1.1 Schülerlabore und Quantenphysik im Unterricht.....	4
2.1.2 Allgemeine Überlegungen zur Quantenphysik .....	15
2.1.3 Folgerungen und Beispiele im Zusammenhang mit dem Unterrichtsgang ....	35
2.2 Praktischer Teil .....	50
2.2.1 Das PhotonLab .....	50
2.2.2 Ablauf des Quantenphysikkurses .....	52
2.2.3 Einführungsvortrag im PhotonLab .....	55
2.2.4 Die Versuchsanleitungen.....	57
2.2.5 Die Versuche .....	63
2.2.6 Testverfahren.....	78
2.2.7 Schulklassen .....	84
3 Auswertung und Ergebnisse.....	86
3.1 Beschreibung der Auswertung .....	86
3.1.1 Die Auswertung der KIM.....	86
3.1.2 Die Auswertung des Wissenstests .....	87
3.2 Die Ergebnisse der KIM.....	89
3.3 Die Ergebnisse des Wissenstests.....	92
3.3.1 Die Ergebnisse des Multiple-Choice Aufgabenteils .....	92
3.3.2 Die Ergebnisse der erste Aufgabe .....	93
3.3.3 Die Ergebnisse der zweiten Aufgabe .....	97
4 Diskussion .....	100
4.1 Die Diskussion der KIM .....	100
4.2 Die Diskussion des Wissenstests.....	103
4.2.1 Die Diskussion der Multiple-Choice-Aufgaben.....	103
4.2.2 Die Diskussion der ersten Aufgabe .....	103
4.2.3 Die Diskussion der zweiten Aufgabe .....	105
4.3 Schlussfolgerung .....	107

4.4	Ausblick .....	109
5	Literaturangaben.....	110
6	Anhang .....	112
7	Abbildungsverzeichnis .....	125

# 1 Einleitung

*„Es gab eine Zeit, als Zeitungen sagten, nur zwölf Menschen verstanden die Relativitätstheorie. Ich glaube nicht, dass es jemals eine solche Zeit gab. Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik.“* (R. Feynman)

Nach obigem Zitat wirkt die Quantenmechanik auf den ersten Blick möglicherweise zu komplex für Schülerinnen und Schüler. Grundsätzlich ist eine Einführung in die Quantenphysik Bestandteil des Lehrplans der 10. Jahrgangsstufe an bayrischen Gymnasien. Die Lernenden dieser Jahrgangsstufe müssen sich demnach mit diesen Lerninhalten auseinandersetzen. In der folgenden Arbeit wird gezeigt, dass ein Kurs in einem Schülerlabor bestens geeignet ist, diese Inhalte zu vermitteln. Wichtig für den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler ist dabei die gezielte Einbettung in den Unterricht. Teil dieser Arbeit war es darüber hinaus einen solchen Kurs zu entwerfen.

Der Kurs findet im PhotonLab statt. Dieses Schülerlabor ist von der Exzellenzinitiative Munich Center for Advanced Photonics (MAP) gegründet worden. Unter der Leitung von Frau Dr. Stähler-Schöpf können Schülerinnen und Schüler ab der 9. Klasse seit 2011 im PhotonLab selbst an Versuchen aus vielen Teilgebieten der Optik arbeiten. Im hier erarbeiteten Kurs haben die Lernenden die Möglichkeit, sich mit ausgewählten Versuchen zu Themen der Quantenphysik in kleinen Gruppen selbst zu beschäftigen.

Ziel des Kurses ist es, dass die Schülerinnen und Schüler Einblicke in die Welt der Quantenphysik erhalten und dabei verschiedene Kompetenzen in diesem Bereich erwerben. Beispielsweise sollten die Lernenden in der Lage sein ausgewählte Phänomene des Welle-Teilchen-Dualismus anhand eines Versuches zu erläutern.

Schülerlabore wurden in der Vergangenheit mehrfach, wie beispielsweise in der Studie von Pawek (2009) auf ihre affektive Wirkung geprüft. In dieser Arbeit soll der Schwerpunkt auf den kognitiven Aspekten des Lernens liegen. Hierzu wird ein Wissenstest entworfen. Mit dessen Hilfe soll überprüft werden, ob die Lernenden bestimmte Lernziele des Kurses erreicht haben. Zudem wurde die intrinsische Motivation der Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der Kurzsкала zur intrinsischen Motivation (KIM) erfasst.

Die eingesetzten Schülerexperimente decken sowohl Themen, die im Lehrplan vorgesehen sind ab, wie die Interferenz von Wellen und den Welle-Teilchen-Dualismus, als auch Inhalte, die darüber hinausgehen, wie beispielsweise die wechselwirkungsfreie

Quantenmessung. Die daraus resultierende Komplexität der Versuche erfordert es, dass die Lernenden sich bereits vor dem Besuch im PhotonLab mit einigen ausgewählten Inhalten auseinandersetzen. Daher sollte der Kurs in den Schulunterricht eingebettet werden. Dies geschah durch eine Vor- und eine Nachbereitungsphase der Lerninhalte in der Schule.

In der Vorbereitungsphase erhalten die Lernenden einen kurzen Einblick in die Quantenphysik, entscheiden sich in kleinen Gruppen für einen der Versuche und erhalten Grundlagen zu diesem. Diese Grundlagen sollen die Lernenden in ihren Gruppen durcharbeiten.

Die nächste Phase findet im PhotonLab statt. Die Schülerinnen und Schüler werden zunächst durch die Leitung des PhotonLabs in die Grundlagen der Wellenlehre und Quantenphysik eingeführt und bekommen im Anschluss eine Unterweisung hinsichtlich Lasersicherheit. In der darauffolgenden Experimentierphase beschäftigen sich die Lernenden in den Gruppen mit ihrem vorbereiteten Versuch.

Die Nachbereitungsphase findet erneut in der Schule statt. Die Lernenden präsentieren ihren Versuch der übrigen Klasse. Diese Präsentation dient dazu, dass alle Lernenden die Versuche einmal gesehen haben und die Gruppen die Inhalte ihres Versuches wiederholen.

Auch nach Pawek (2009) ist eine Vor- und Nachbereitung des Schülerlaborbesuches sinnvoll. Die affektive Wirksamkeit von Schülerlaboren wie sie in Paweks Studie (2009) untersucht wurde und die Wirkung auf kognitive Lernaspekte wird im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2.1.1) näher beschrieben. Dieser erste Teil widmet sich vor allem fachdidaktischen Grundlagen zum Thema Schülerlabore und Quantenphysik im Schulunterricht. Im Zuge dessen wird auf ein von Schorn et al. (2008) entworfenes Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik eingegangen. Im nächsten Kapitel (2.1.2) folgt ein Überblick über Quantenphysik des entworfenen Kurses. Daraufhin werden ausgewählte Phänomene der Experimente des Kurses näher erläutert wie beispielweise das Komplementaritätsprinzip und die wechselwirkungsfreie Quantenmessung.

Nach diesem Theorieteil werden die Planung und der Ablauf des Kurses näher beschrieben. Hierzu werden unter anderem der Einführungsvortrag, die Versuchsanleitungen und die Versuche selbst vorgestellt. Zudem enthält dieser Abschnitt einen Überblick über das Verfahren zur Einstufung des Lernerfolgs sowie eine Beschreibung der Schulklassen, welche den Kurs besucht haben.

Die Auswertung und Ergebnisse des Testverfahrens findet sich in Kapitel 3. Im Anschluss daran folgt eine Diskussion der Ergebnisse. Zuletzt wird ein Ausblick auf die Fortführung des Kurses gegeben.

## 2 Methoden

### 2.1 Theoretischer Teil

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, die für den entworfenen Kurs zentral sind. Hierbei handelt es sich zunächst um fachdidaktische Grundlagen, die sich unter anderem aus allgemeinen Befunden zu Schülerlaboren und deren Wirksamkeit zusammensetzen. Zudem werden die Inhalte des Lehrplans der 10. Jahrgangsstufe, die sich auf das Thema Quantenphysik beziehen, kurz beschrieben und ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik vorgestellt. Daraufhin werden fachliche Grundlagen wie die Quantenphysik des Kurses und ausgewählte Beispiele erläutert.

#### 2.1.1 Schülerlabore und Quantenphysik im Unterricht

##### Schülerlabore und Einbettung

###### *Allgemeines*

Schülerlabore sind außerschulische Einrichtungen, mit deren Hilfe die naturwissenschaftliche Bildung gefördert werden soll. In den Laboren können die Schülerinnen und Schüler selbst experimentieren, um Fragestellungen aus den Naturwissenschaften mit Hilfe der Versuche zu beantworten. Im Vordergrund steht die Authentizität der naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen (Kircher, Girwidz & Häußler, 2015, S.760f).

In den letzten 20 Jahren richteten Universitäten und Forschungseinrichtungen mehr dieser außerschulischen Lernorte ein. Zentrale Ziele der Schülerlabore sind unter anderem das Interesse für Naturwissenschaften zu fördern, eine Lernumgebung zu schaffen, in der aktive Auseinandersetzung mit realitätsnahen Problemen möglich ist, und Lerngelegenheiten zu bieten. (Kircher et al., 2015, S. 760 ff)

###### *Wirksamkeit von Schülerlaboren*

Aus fachdidaktischer Sicht ist ein Vorzug der Labore, dass die Lernenden eigenständig experimentieren können. Die Experimente sind in den naturwissenschaftlichen Fächern das zentrale Medium. (Pawek, 2009 ,S.12f)

Experimente können genutzt werden, um naturwissenschaftliche Arbeitsweisen zu veranschaulichen und Wissen zu vermitteln. Einige zentrale Funktionen von Experimenten im Physikunterricht sind beispielsweise das Aufzeigen von Phänomenen, Physik im All-



tag und Technik nachzustellen oder theoretische Aussagen zu prüfen. (Kircher et al., 2015, S.229f)

Im Vergleich zum Unterricht in Schulen sind Schülerlabore darüber hinaus nicht an bestimmte Vorgaben wie zum Beispiel durch einen Lehrplan gebunden. Dies ermöglicht ihnen, die Lernumgebungen frei zu gestalten (Kircher et al., 2015, S. 765).

Die Wirksamkeit der Schülerlabore wurde zunächst in Frage gestellt. Durch fehlende Vor- und Nachbereitung im Unterricht scheint es schwer möglich, dass die Labore einen langfristigen Effekt auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler haben. (Kircher et al., 2015, S. 765)

Jedoch zeigen Studien in mehreren Fächern, dass zumindest kurzfristige und mittelfristige Effekte auf die affektiven Aspekte des Lernens nachgewiesen werden können. Dies betrifft sowohl das Interesse an dem jeweiligen Fach, die Motivation sowie zum Teil das Selbstkonzept der Lernenden. (Kircher et al., 2015, S. 765f)

#### - Wirkung auf affektive Aspekte des Lernens

Zur Wirkung von Schülerlaboren wurden viele Studien durchgeführt (beispielsweise Pawek (2009), Guderian (2007), Streller (2015), Scharfenberg (2005)). Die Auswirkungen eines Besuchs im Schülerlabor auf die affektiven Aspekte des Lernens wurden schon mehrfach untersucht (Pawek (2009), Streller (2015)).

Pawek (2009) beschäftigt sich beispielsweise mit der Frage, ob „die Lernumgebung Schülerlabor das Interesse der Schüler an der im Labor behandelten Naturwissenschaft [fördert] und welche Faktoren ... daran maßgeblich beteiligt [sind]...“(Pawek, 2009, S. 64). Die Studie brachte unter anderem folgende Erkenntnisse:

- Bei einem Großteil der Lernenden kann ein Anstieg des Interesses am Physikunterricht aufgrund des Besuches im Schülerlabor beobachtet werden.
- Der Anstieg des Interesses kann auch noch mehrere Wochen nach der Laborveranstaltung erkannt werden
- Ein Großteil der Lernenden erachtet den Lernerfolg im Physikunterricht geringer als den im Schülerlabor

(Pawek, 2009, S. 169)

Streller (2015, S. 134) untersuchte unter anderem den Zusammenhang einer Vor- und Nachbereitung eines Schülerlaborbesuches mit dem aktuellen Interesse der Lernenden.

Die Ergebnisse zeigten, dass ein positiver Zusammenhang zwischen dem aktuellen Interesse und der Einbettung des Schülerlaborbesuches besteht. Zudem empfanden die Lernenden den Besuch als verständlicher und wichtiger, als Lernende, deren Schülerlaborbesuch nicht in den Unterricht eingebettet war. (Streller, 2015, S.134f)

Während die Auswirkungen von Schülerlaborbesuchen auf affektive Lernziele bereits recht gut erforscht sind, gilt dies nicht für die kognitiven Lernziele. Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit soll daher auf der Untersuchung der kognitiven Lernmöglichkeiten liegen. Einige affektiven Aspekte werden lediglich am Rande mit Hilfe der Kurzsкала zur intrinsischen Motivation (KIM, Wilde, n Bätz, Kovaleva & Urhahne, 2009) erfasst.

- Wirkung auf kognitive Aspekte des Lernens:

Nach Guderian (2006, S.16f) kann an außerschulischen Lernorten zuweilen beobachtet werden, dass die Lernenden desorientiert sind und schlechtere Leistungen bringen. Dieses Phänomen lässt sich auf eine Art kognitiven Overload zurückführen, der aufgrund der für die Lernenden neuen, stimulierenden Umgebung entsteht (Guderian, 2006, S.16f).

Es kann gezeigt werden, dass ein Eingliedern der Schülerlaborbesuche in den Unterricht diese negativen Effekte reduziert und positive Auswirkungen auf die kognitiven Leistungen der Lernenden hat. Die Einbindung erfordert eine Vor- und Nachbereitung des Schülerlaborbesuchs im Unterricht, Verweise auf bereits im Unterricht besprochene Themen während des Laborbesuchs und die Besprechung und weitere Behandlung von speziellen Experimenten, die im Labor von den Schülerinnen und Schülern durchgeführt wurden. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die im Labor erworbenen naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen im Unterricht gefestigt werden sowie im Unterricht erlernte Instrumente ebenfalls Anwendung während der Experimentierphase im Labor finden. Durch die Einbettung konnten die Lernenden zudem einen Bezug zum Unterricht herstellen. (Guderian, 2006, S.168f)

Auch nach Pawek (2009, S. 176f) ist eine Vorbereitung und Nachbereitung der Versuche sinnvoll, da die Lernenden dadurch auf ihr Vorwissen zurückgreifen und Theorie und Praxis besser verbinden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Schülerlabore einen positiven Effekt auf bestimmte Komponenten des affektiven Lernens haben. Jedoch sollte der Besuch im Schülerlabor durch Vor- und Nachbereitung im Unterricht unterstützt werden, um die Effekte zu stabilisieren und einen Effekt auf die kognitiven Leistungen zu erzielen. Hierbei ist es vor allem von Bedeutung, Zusammenhänge zwischen Schülerlabor und Unterricht hervorzuheben. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine mögliche Einbettung zu entwerfen, die positive Auswirkungen auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler hat. Hierzu wurden die Lehrplanaspekte und ein bereits bestehendes Unterrichtskonzept zur Quantenphysik betrachtet, die in folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

### **Lehrplanaspekte**

Die Klassen, die in folgender Arbeit betrachtet werden, nahmen im Juni und Juli 2017 an dem Quantenphysikkurs teil. In diesem Zeitraum galt der Lehrplan, der im folgenden Abschnitt zum Teil beschrieben wird. In Bereich Quantenphysik ähnelt der Lehrplan-PLUS diesem Lehrplan, weshalb dessen Aspekte zu diesem Themenbereich nicht aufgeführt werden.

#### *Lehrplan bis 2017/2018*

Der Lehrplan des achtjährigen bayrischen Gymnasiums sieht in der 10. Klasse einen Abschnitt zur Wellenlehre und Quantenphysik vor. Dieser Abschnitt „Ph. 10.3 Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik“ enthält folgende Themenbereiche.

- Wellenphänomene

Dieser Bereich enthält die Unterscheidung zwischen Transversal- und Longitudinalwellen. Zudem soll die Interferenz kreisförmiger Wellen behandelt werden. (ISB, 2004a)

- Der Welle-Teilchen-Dualismus von Licht

Im Zuge des Wellencharakters sollen Experimente am Doppelspalt durchgeführt werden, sodass Interferenzbilder beobachtet werden können. Bei der Thematisierung des Teilchencharakters soll der photoelektrische Effekt gezeigt und der Zusammenhang zwischen Photonenenergie und Wellenlänge erarbeitet werden. Die Thematisierung des Wellen- und Teilchencharakters von Licht erfolgt in dieser Jahrgangsstufe hauptsächlich

lich qualitativ. Durch das Doppelspaltexperiment wird der Wellencharakter von Licht diskutiert. Hingegen kann das Hallwachsexperiment den Teilchencharakter gut veranschaulichen. In den Unterrichtseinheiten zu diesem Thema sollen diese widersprüchlichen Ergebnisse der Versuche behandelt werden. (ISB, 2004a)

- Der Welle-Teilchen-Dualismus von Elektronen

Die Elektronenbeugung soll anhand eines Versuches beobachtet werden und das Doppelspaltexperiment soll anhand einer Animation mit Elektronen diskutiert werden. (ISB, 2004a)

- Photonen und Masseilchen als Quantenobjekte

Dieser Abschnitt hat zum Ziel, dass die Lernenden ihre bisherige klassische Vorstellung zu Impuls und Ort von Teilchen aufgeben. (ISB, 2004a)

Ferner enthält der Lehrplan die folgenden Richtlinien:

*„Die Schüler erarbeiten sich grundlegende Kenntnisse über Wellen und deren Ausbreitung. Experimente verdeutlichen den Wellen- und Teilchencharakter von Licht sowie von Masseilchen und führen zu einer neuen Physik – der Quantenphysik. Die Jugendlichen gewinnen einen Einblick in grundlegende Inhalte und Denkweisen dieser Theorie. Dabei wird ihnen bewusst, dass ihre bisherige, von der klassischen Mechanik bestimmte Anschauung in manchen Fällen versagt und dass die Quantenphysik zwangsläufig zu einem fundamental anderen physikalischen Weltbild führt.“* ( ISB, 2004a)

### **Schülervorstellung zur Quantenphysik**

Einige zentrale Lernschwierigkeiten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schüler zum Thema Quantenmechanik werden im folgenden Abschnitt besprochen.

Bei der Betrachtung von Atommodellen fällt auf, dass die Lernenden oft zu stark in nur einer, meist besonders anschaulichen Modellvorstellung verhaftet sind. Beispielsweise nehmen manche Schülerinnen und Schüler nach Durchlaufen der Mittelstufe an, dass die Elektronen sich, wie Planeten auf Bahnen um den Atomkern bewegen. Das Bohrsche Atommodell wurde somit von diesen Lernenden nicht als Modell erkannt. (Schorn & Wiesner, 2008, S. 27)

Gemäß dem Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB, 2004b) wird das Bohrsche Atommodell im Lehrplan des Faches Physik nicht mehr behandelt, da es zu der oben beschriebenen Fehlvorstellung führen kann.

*„Dieses Modell ist zwar sehr einprägsam, jedoch nach heutigem Erkenntnisstand der Physik falsch. Aus diesem Grund sollten Bilder mit kreisenden Elektronen vermieden werden.“* (ISB, 2004b)

Betrachtet man die Vorstellung zu Bestandteilen des Atoms, wird auch weiterhin der Teilchencharakter des Elektrons in den Vordergrund gestellt. Diese Vorstellung hält sich auch, nachdem die Beugung von Elektronen am Doppelspalt oder ähnliche Experimente diskutiert wurden. (Schorn & Wiesner, 2008, S. 27)

Bei der Behandlung von Eigenschaften von Quantenobjekten im Vergleich mit klassischen Objekten, geben nur wenige Lernende an, dass der Ort eine Eigenschaft klassischer Teilchen ist, die Quantenobjekte nicht aufweisen. Die Lernenden haben demnach Schwierigkeiten, die bisherigen klassischen Vorstellungen in diesem Bereich der Physik aufzugeben. (Schorn et al., 2008, S. 27)

### **Quantenphysik im Unterricht**

Wie im Abschnitt „Lehrplanaspekte“ beschrieben handelt es sich bei dem Bereich Ph. 10.3 *Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik* um eine größtenteils qualitative Einführung in den Bereich der Quantenphysik.

Da die Schülerinnen und Schüler mit Einführung des achtjährigen Gymnasiums in Bayern Physik nach der 10. Jahrgangsstufe abwählen können, wurde dieser Bereich in den Lehrplan der 10. Klasse aufgenommen. So erhalten die Lernenden einen kurzen Einblick in die Welt der Quantenphysik und lernen zentrale Aspekte daraus kennen, auch wenn sie das Fach Physik in der Oberstufe nicht fortsetzen. Um die komplexen Themen der Quantenphysik bereits in der 10. Klasse thematisieren zu können, war eine neue Herangehensweise nötig. (Schorn et al., 2008, S. 26)

Das hierzu von Schorn et al. (2008) entwickelte Unterrichtskonzept, geht unter anderem aus dem Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik hervor. Es soll den Lernenden dabei helfen, ihre bisherigen Fehlvorstellungen (s. Abschnitt zu Schülervorstellungen zu Quantenphysik) zu überwinden und eine aus physikalischer Sicht korrekte,

grundlegende Beschreibung zu verinnerlichen. Hierzu wurden verschiedene Unterrichtseinheiten beschrieben. Diese enthalten folgende Themen:

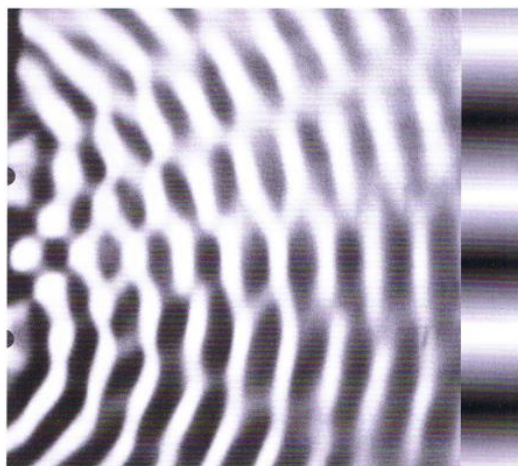
- Wellen
- Einführung in die Quantenphysik
- Das Doppelspaltexperiment
- Weitere Merkwürdigkeiten der Quantenphysik
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- Anwendungsmöglichkeiten der Quantenphysik

(Schorn et al., 2008, S. 27ff)

In folgenden Abschnitten wird eine für die vorliegende Arbeit bedeutsame Auswahl der Unterrichtseinheiten vorgestellt.

Die erste Unterrichtseinheit beschäftigt sich mit dem Thema Wellen. Unter anderem soll die Interferenz von Wellen qualitativ betrachtet werden. Um das Doppelspaltexperiment mit Elektronen später besser diskutieren zu können, soll die Interferenz als charakteristische Eigenschaft von Wellen behandelt werden. Zudem soll der Zusammenhang zwischen dem Interferenzmuster, das sich durch die Überlagerung durch kreisförmige Wellen ergibt und dem klassischen Streifenmuster (s. Abbildung 1) erarbeitet werden.

(Schorn et al., 2008, S. 28)

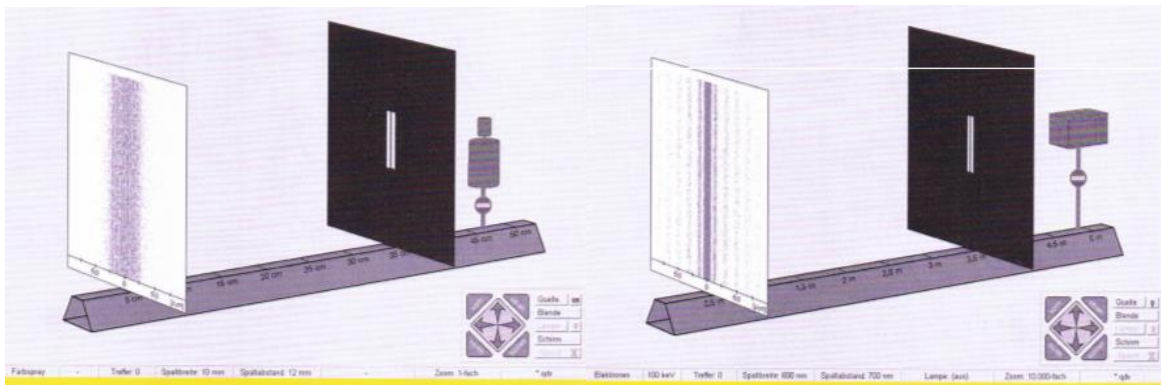


**Abbildung 1: Interferenzmuster zweier kreisförmiger Wellen (links), Streifenmuster (rechts) (Schorn et al., 2008, S.26)**

Die zweite Unterrichtseinheit umfasst die Gegenüberstellung der klassischen Physik und der Quantenphysik. Der Ort ist eine Eigenschaft von Objekten der klassischen Physik. Wie zuvor bereits erwähnt wurde, besitzen Quantenobjekte diese Eigenschaft nicht.

Dieser Unterschied soll mit Hilfe von Versuchen im Bereich der klassischen und im Bereich der Quantenphysik erarbeitet werden. (Schorn et al., 2008, S. 28)

Das Doppelspaltexperiment ist Gegenstand der darauffolgenden Unterrichtseinheit. Es wird eine Simulation (s. Abbildung 2) des Doppelspaltexperiments mit klassischen Teilchen und mit Elektronen durchgeführt. Die Ergebnisse werden verglichen und diskutiert. Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen zeigt, dass den Elektronen keine Ortseigenschaft zugeordnet werden kann. Es kann nicht bestimmt werden, durch welchen der Spalte ein Elektron zu dem Schirm gelangt ist. (Schorn et al., 2008, S. 28f)



**Abbildung 2: Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen (links) und Elektronen (rechts) (Schorn et al., 2008, S. 29)**

In der nächsten Unterrichtseinheit wird das Komplementaritätsprinzip anhand eines Doppelspalts mit Elektronen diskutiert. Mit Hilfe einer Cartoonserie soll eine weitere Merkwürdigkeit der Quantenphysik betrachtet werden. Die Serien „Erster Elektronen-Skilauf“ und „Zweiter Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ werden zur Veranschaulichung des Doppelspaltexperiments mit Elektronen und des Doppelspaltexperiment, bei dem der Ort der Elektronen beim Durchgang durch den Doppelspalt bestimmt wird, gezeigt. In der Cartoonserie sind die Elektronen Skiläufer, die die Wahl haben links oder rechts an einem Baum vorbeizufahren. Im „Ersten Elektronen-Skilauf“ kann nun beobachtet werden, dass die Skifahrer mit einem Ski links und mit dem anderen rechts an dem Baum vorbeigefahren sind (s. Abbildung 3 links). Man kann nicht vorhersagen, welcher Elektronenskiläufer welchen Weg genommen hat. Die Skifahrer sind wie in einem Interferenzmuster verteilt. (Schorn et al., 2008, S. 29f)

Die Resultate des Doppelspaltexperiments werden über diese Analogie auf einen Kontext übertragen, der den Schülerinnen und Schülern vertraut ist (Schorn et al., 2008, S. 29). Gemäß Kircher et al. (2015, S. 128f) ist eine notwendige Bedingung für den Einsatz einer Analogie die Verbundenheit beziehungsweise Vertrautheit mit dem Kontext. Der hierbei verwendete

Kontext „Skifahren“ erfüllt somit diese Bedingung. Um die Akzeptanz der Analogie zu gewährleisten muss sie oberflächenähnlich sein, was jedoch im Allgemeinen bereits durch die Vertrautheit erfüllt ist (Kircher et al., 2015, S. 128f).

Die „Skifahrer“ könnten jedoch von den Schülerinnen und Schülern rein als Teilchen gesehen werden. Diese würde die Schüler bei der Fehlvorstellung, dass sich Elektronen nur wie Teilchen verhalten, bestärken. Es muss demnach bei der Verwendung der Analogie darauf eingegangen werden, dass sich die Elektronenskiläufer bei dem ersten Elektronenskilauf nicht an dem Baum aufteilen. Sie verhalten sich wie eine Welle.

Bei dem „Zweiten Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ werden die Skiläufer mittels Livecam in der Baumebene beobachtet und damit festgestellt an welcher Seite vom Baum sie vorbeigefahren sind. Die Spuren zeigen nun deutlich, dass die Elektronenskiläufer entweder links oder rechts an dem Hindernis vorbeigefahren sind (s. Abbildung 3 rechts). Die Verteilung der Skifahrer entspricht der Verteilung klassischer Teilchen im Doppelspaltversuch. In der Unterrichtseinheit soll im Zuge dessen ein weiterer Unterschied zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik diskutiert werden. Das Messen von Eigenschaften, wie der Ortseigenschaft der Elektronen in der Spaltebene, ist nicht äquivalent dazu, dass eine Eigenschaft besessen wird. (Schorn et al., 2008, S.29f)



**Abbildung 3: Ergebnisse des „Ersten Elektronen-Skilauf“ (links) und „Zweiten Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ (rechts) (Schorn et al., 2008, S. 30f)**

Anhand einer Probe an 137 Lernenden wurde das neue Unterrichtskonzept überprüft. Die Resultate ergaben, dass die meisten Lernenden die Lernziele erreicht haben. Sie zeigten damit, dass komplexe Themen der Quantenphysik trotz ihres hohen Anspruchs bereits in der 10. Jahrgangsstufe erfolgreich unterrichtet werden können. (Schorn et al., 2008, S. 32f)



## **Ein Quantenphysikkurs im Schülerlabor**

Nachdem bereits das oben beschriebene Unterrichtskonzept für Quantenphysik in der 10. Jahrgangsstufe besteht, stellt sich die Frage, warum man einen Kurs zu dieser Thematik in einem Schülerlabor anbieten sollte.

Zum einen bietet der entworfene Kurs den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit selbstständig an Experimenten zu arbeiten. Dies hilft den Lernenden physikalische Vorstellungen aufzubauen, naturwissenschaftlich zu arbeiten und weckt Interesse sowie Motivation (Kircher et al. 2015, S. 229f).

Die Ausstattung des Schülerlabors ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern zudem mit Experimenten zu arbeiten, die für die meisten Schulen nicht bezahlbar sind. Die Lernenden können somit die Resultate an Experimenten beobachten, die sie zuvor selbst durchgeführt haben, anstatt sie anhand einer Simulation zu beobachten oder nur theoretisch im Unterricht zu besprechen. Sie können so die zuvor erlernte Theorie anhand realer Experimente prüfen (Kircher et al., 2015, S. 229).

Darüber hinaus erhalten die Lernenden durch die Lernumgebung im Schülerlabor Einblick in authentische, naturwissenschaftliche Arbeitsweisen und Forschung (Kircher et al., 2015, S. 760f). Zudem hat der Besuch eine positive Wirkung auf affektiven Komponenten des Lernens wie zu Beginn dieses Kapitels anhand der Studie von Pawek aufgezeigt wurde.

Durch die gezielte Einbettung des Kurses im Unterricht sollen zudem die Effekte auf die kognitiven Aspekte stabilisiert werden, sodass die Lernenden neben einem gesteigerten Interesse für die Thematik zudem gute Voraussetzungen für einen länger andauernden Anstieg des Lernerfolgs haben.

Die Studie von Guderian (2006) zeigte bereits, dass sich eine Einbettung positiv auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler auswirkt. Jedoch besteht hierbei noch Forschungsbedarf, da die Einbettung und das Lernen von Inhalten in Schülerlaboren bisher nur wenig evaluiert wurde. Der Wissenstest, den die Teilnehmer des Kurses bearbeiten, soll Aufschluss darüber geben, wie erfolgreich die Einbettung und die Vermittlung der Lerninhalte im entworfenen Kurs sind.

Auch zur Thematik des Kurses gibt es bisher nur einen einzigen erprobten Unterrichtsgang. Dieses vorgestellte Unterrichtskonzept von Schorn et al. (2008) greift auf Computersimulationen zurück anstatt Realexperimente zu verwenden. Simulationen können zwar den Unter-

richt erweitern indem sie Einblicke in Versuche ermöglichen, die in der Schule nicht vorhanden sind, jedoch können sie keine echten Experimente ersetzen (Kircher et al., 2015, S. 859).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Durchführung und Auswertung des Kurses neben den allgemeinen Vorteilen, die Schülerlabore mit sich bringen, zudem Einblick in bisher wenig erforschte Bereiche der Wirksamkeit von Schülerlaboren und deren Einbettung in den Schulunterricht liefert.

## 2.1.2 Allgemeine Überlegungen zur Quantenphysik

„*Quantum mechanics*“ is the description of the behavior of matter and light in all its details and, in particular, of the happenings on an atomic scale. Things on a very small scale behave like nothing that you have any direct experience about. They do not behave like waves, they do not behave like particles, they do not behave like clouds, or billiard balls, or weights on springs, or like anything that you have ever seen.“

(Gottlieb, 2013)

Das Verhalten von Quantenobjekten kann demnach nicht mit Objekten aus unserem alltäglichen Leben verglichen werden. Die Erfahrungen und Intuitionen, die man für den Makrokosmos entwickelt hat, sind für Objekte atomarer Größenordnung nicht mehr zutreffend (Gottlieb, 2013).

Um die Natur von Licht und anderen Quantenobjekten genauer beschreiben zu können, wurden viele Experimente durchgeführt. Versuche wie das Doppelspaltexperiment sollten Aufschluss über den Charakter von Licht bringen.

Hierzu betrachte man zunächst folgendes Experiment mit Wasserwellen. Trifft eine Wasserwelle auf einen Doppelspalt (s. Abbildung 4 (a)), bilden sich zwei kreisförmige Wellen an dem Spalt aus. Diese überlagern sich (s. Abbildung 4 (b)) und wir erhalten eine Intensitätsverteilung wie sie in Abbildung 4 (c) zu sehen ist. (Gottlieb, 2013)

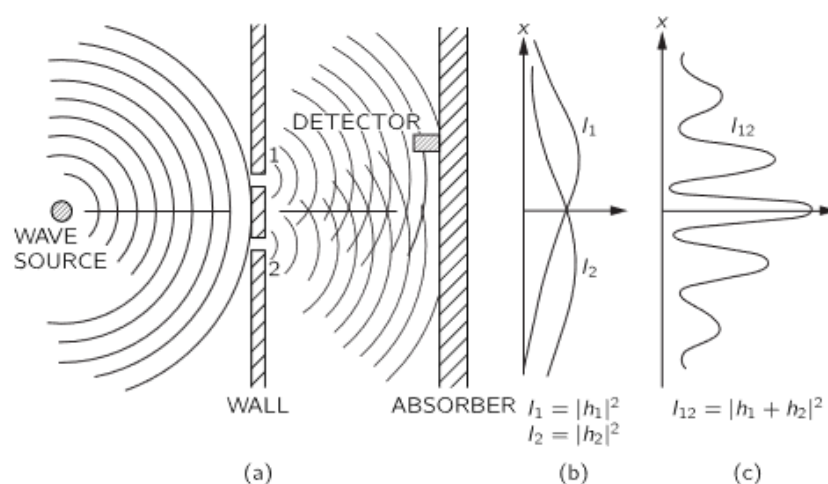
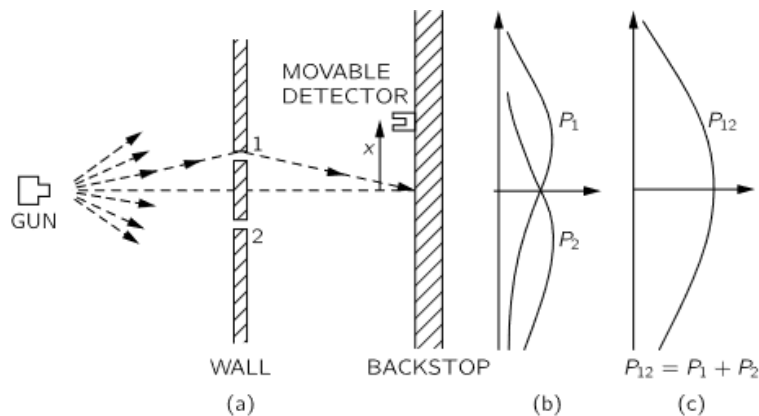


Abbildung 4: Wasserwellen am Doppelspalt (Gottlieb, 2013)

Man führt den Versuch nun mit Licht statt mit Wasserwellen durch, indem man eine Lichtquelle vor dem Doppelspalt platziert. Geht man davon aus, dass es sich bei Licht um klassische Teilchen wie zum Beispiel Patronenkugeln handelt, so würde man erwarten, dass sich auf dem Schirm (s. Abbildung 4 „Absorber“) eine Verteilung wie in Abbildung 5 ergibt, die entsteht, wenn man die Einzelspaltverteilungen (s. Abbildung 5 (b)) addiert (Schorn et al., 2008, S. 29).



**Abbildung 5: Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen (Patronenkugeln). (a) zeigt den Versuchsaufbau, (b) die Einzelspaltverteilungen, (c) die gesamte Verteilung (Gottlieb, 2013)**

Die Durchführung zeigt jedoch, dass sich bei hinreichend kleinem Doppelspalt eine ähnliche Intensitätsverteilung wie in dem vorigen Versuch mit Wasserwellen ergibt (Hecht, 2002, S.393). Thomas Young, der diesen Versuch zu Beginn des 19. Jahrhunderts durchführte, bestätigte so den Wellencharakter von Licht (Hecht, 2002, S.4).

### Der Welle-Teilchen-Dualismus von Licht

Im 19. Jahrhundert nahm man darauf gemeinhin an, dass es sich bei Licht um eine Welle handelt. Zu dieser Erkenntnis führten viele Experimente, in denen sich Licht wie eine Welle verhielt, wie beispielsweise die Beobachtungen von Interferenzmustern und Beugungsphänomenen (Tipler et al., 2015, S.1061).

Das folgende Kapitel beschäftigt sich zunächst mit dem Wellencharakter von Licht. Im Zuge dessen wird auf die Wellengleichung und Eigenschaften von Wellen eingegangen. Im Anschluss wird das Doppelspaltexperiment näher beschrieben.

### Die Wellengleichung

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Im Gegensatz zu mechanischen Wellen wie beispielsweise Schallwellen brauchen elektromagnetische Wellen kein Medium um sich ausbreiten zu können. Die Welle hat einen elektrischen und einen magnetischen Anteil. Man erhält somit zwei Wellenfunktionen, eine für das elektrische Feld  $E(x,t)$ , in der Abbildung 6 durch den roten Anteil dargestellt, und eine für das damit gekoppelte magnetische Feld  $B(x,t)$ , der blaue Anteil in der Abbildung 6 (Tipler et al., 2015, S.468).

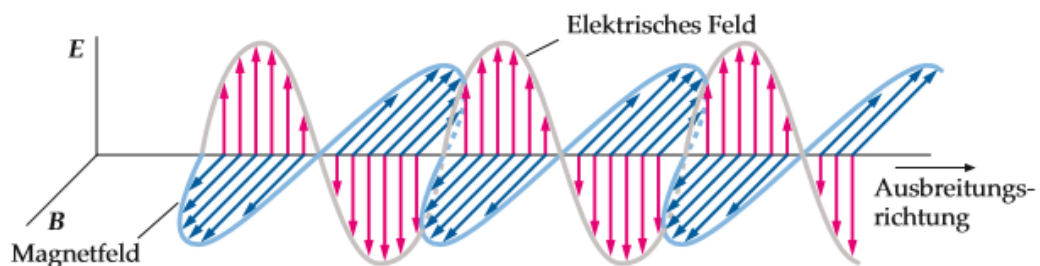


Abbildung 6: Elektrischer und magnetischer Anteil einer elektromagnetischen Welle (Tipler et al., 2015, S. 988)

Maxwell lieferte 1865 mit seinen Gleichungen zum Elektromagnetismus das theoretische Fundament der Beschreibung von elektromagnetischen Wellen (Gobrecht et al., 1987, S.171).

Aus den Maxwellgleichungen ergeben sich folgende Wellengleichungen:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2)$$

$\mathbf{E}$  bezeichnet den elektrischen Feldvektor,  $\mathbf{B}$  den magnetischen Feldvektor. (Hecht, 2002, S. 44f)

Die Konstanten  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  bezeichnen die elektrische und magnetische Feldkonstante (Tipler, 2015, 1386). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Vakuum  $c$  ergibt sich aus

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3)$$

(Hecht, 2002, S. 45f).

Die elektrische Feldstärke  $E$  und magnetische Feldstärke  $B$  einer Welle sind aneinander gekoppelt:

$$E = cB \quad (4)$$

(Tipler et al., 2015, S.983ff)

### *Die Periodizität von Wellen*

Bei elektromagnetischen Wellen handelt es sich oftmals um ebene periodische Wellen. Die Wellenlänge  $\lambda$  beschreibt dabei die räumliche Periode einer Welle. Die Ausbreitung einer periodischen Welle kann durch eine Sinus- bzw. Kosinus Funktion beschrieben werden.

$$E = E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (5)$$

(Demtröder, 2013, S. 193f)

Dabei stellt  $E_0$  die Amplitude der Welle und  $\omega$  die Kreisfrequenz dar. Diese Kreisfrequenz ergibt sich aus

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (6)$$

(Demtröder, 2013, S. 193f).

Es ergibt sich folgende Periodizitätsbedingung für die Konstante  $k$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

Die Konstante  $k$  wird Wellenzahl genannt. Breiten sich die Wellen in beliebige Richtung aus, ist  $\mathbf{k}$  der Wellenvektor bzw. Ausbreitungsvektor der Wellen. (Demtröder, 2013, S.194)

Je nach gegebener Anfangsbedingung kann als Ansatz eine Sinus- oder Kosinus Funktion verwendet werden. Allgemein wird häufig die komplexe Schreibweise genutzt:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}_0 e^{i(kz - \omega t)} + \mathbf{A}_0^* e^{-i(kz - \omega t)} \quad (8)$$

$A_0$  bezeichnet die Amplitude der Welle.

Für die dreidimensionale, komplexe Darstellung der Wellengleichung mit Ortsvektor  $\mathbf{r}$  erhält man:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (9)$$

(Demtröder, 2013, S. 194).

### *Die Polarisation von Licht*

Eine elektromagnetische Welle kann linear und zirkular polarisiert sein. Die Polarisation einer Welle beschreibt die Ausbreitungsrichtung des elektrischen Feldvektors  $\mathbf{E}$  im Raum (Demtröder, 2013, S. 194 ff). Im Folgenden soll nur die lineare Polarisation betrachtet werden, da nur diese Gegenstand einiger Versuche im beschriebenen Quantenphysikkurs ist.

Betrachten wir eine Welle, die sich entlang der x-Achse ausbreitet, so sind mögliche Lösungen für die Wellengleichung:

$$\mathbf{E} = A_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \frac{A_0}{c} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (11)$$

$k_x$  bezeichnet in den obigen Gleichungen die x-Komponente des Wellenvektors  $\mathbf{k}$ . (Gobrecht et al., 1987, S. 178)

Aufgrund der Symmetrie existiert auch eine Lösung für diese Wellengleichung, bei der das elektrische Feld parallel zur y-Achse und das magnetische Feld parallel zur z-Achse sind. Diese beiden möglichen Lösungen unterscheiden sich in ihrer Polarisation. Die Polarisationsrichtung wird anhand der Richtung des elektrischen Feldvektors bestimmt. Man unterscheidet horizontal und vertikal polarisiertes Licht. Die beiden Polarisationen werden in Folgenden mit  $\mathbf{e}_1$  und  $\mathbf{e}_2$  bezeichnet. Bei den dargestellten Lösungen in Gleichung (10) und (11) handelt es sich um vertikal polarisiertes Licht, da der elektrische Feldvektor in x-Richtung zeigt (s. Abbildung 7). (Gobrecht et al., 1987, S. 178f)

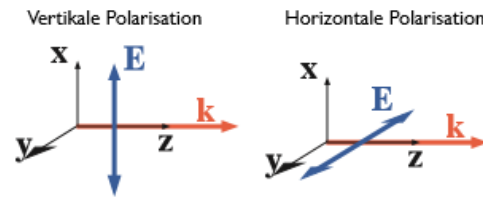


Abbildung 7 Lineare Polarisation von Wellen (Gobrecht, 1987, S. 178)

Jede Superposition dieser beiden Wellen mit Polarisation  $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$  ist eine Lösung der Wellengleichung, die denselben Wellenvektor  $\mathbf{k}$  und dieselbe Kreisfrequenz  $\omega$  wie die obigen Lösungen hat.

Falls  $E_1$  und  $E_2$  die gleiche Phase haben, ist die Welle linear polarisiert. Die Richtung des elektrischen Feldvektors  $\mathbf{E}$  wird durch das Größenverhältnis der Amplituden der Wellen bestimmt (s. Abbildung 8).

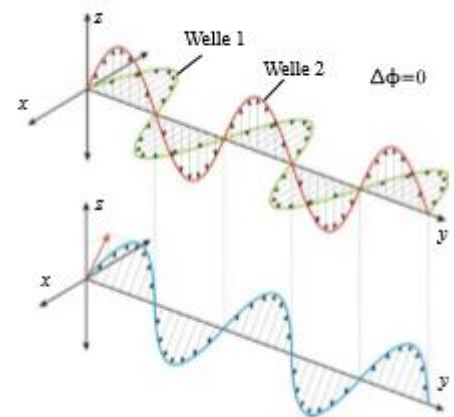


Abbildung 8: Linear polarisierte Welle (Gobrecht, 1987, S.179)

$$\mathbf{E} = (\mathbf{e}_1 E_1 + \mathbf{e}_2 E_2) e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (12)$$

(Gobrecht, 1987, S.179)

### Die Interferenz von Wellen

Betrachtet man die Überlagerung mehrerer Wellen wie beispielsweise im Doppelspaltexperiment zu Beginn des Kapitels, erkennt man, dass die gesamte Feldstärke des Wellenfeldes von den Amplituden und Phasen der einzelnen, sich überlagernden Teilwellen abhängt. Dieses Phänomen wird Interferenz von Wellen genannt. Das Interferenzfeld beschreibt das Gebiet, in dem sich die einzelnen Wellen überlagern (Demtröder, 2013, S.300).



Im Folgenden werden harmonische Wellen betrachtet. Harmonische Wellen können immer durch eine Sinus- oder Kosinus-Funktion beschrieben werden (Tipler et al., 2015, S. 464).

Werden zwei Wellen überlagert, die gleiche Frequenz, Polarisation und Wellenlänge aufweisen, entsteht eine neue harmonische Welle. In Abbildung 9 werden die Teilwellen (blau) einmal konstruktiv (oben) und einmal destruktiv (unten) überlagert. Die Amplitude dieser neu entstandenen Welle ergibt sich aus der Phasendifferenz  $\delta$  der beiden Wellen. Man spricht hierbei von konstruktiver Interferenz, falls sich die Phasen nicht oder um ein ganzzahliges Vielfaches von  $2\pi$  unterscheiden. Die resultierende Intensität ist in diesem Fall maximal. Entspricht die Phasendifferenz  $\pi$  beziehungsweise einem ungeradem ganzzahligem Vielfachen von  $\pi$ , ist die Intensität minimal. In diesem Fall spricht man von destruktiver Interferenz (Tipler et al., 2015, S. 1086).

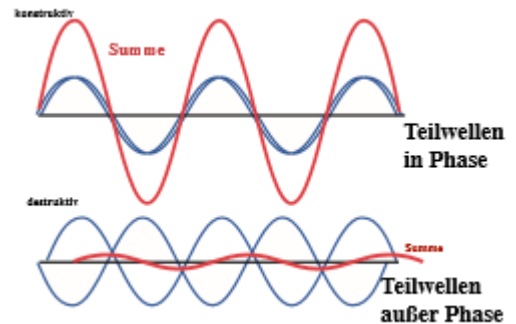


Abbildung 9: Interferenz von 2 Wellen (Bergmann-Schäfer, 1987, S.211)

Die interferierenden Wellen durchlaufen bis zu ihrem Aufeinandertreffen unterschiedlich lange Wegstrecken. So entsteht die Phasendifferenz. Der Unterschied zwischen den zurückgelegten Wegen wird Gangunterschied  $\Delta r$  genannt. Es gilt der Zusammenhang:

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} 2\pi \quad (13)$$

(Tipler et al., 2015, S.1086)

Ein optisches Interferometer, das Michelson-Interferometer, wird in dem folgenden Abschnitt näher behandelt.

- Das Michelson-Interferometer

Das Michelson Interferometer geht zurück auf Albert Michelson. Dieser führte damit im Rahmen der Äthertheorie Messungen der Lichtgeschwindigkeit durch (Tipler et al., 2015, S. 1123). Der Versuchsaufbau eines Michelson-Interferometers, wie es heutzuta-

ge verwendet wird, ist in Abbildung 10 dargestellt. Er setzt sich aus einem Strahlteiler, zwei Spiegeln, einem Laser und einem Schirm zusammen. (Gobrecht, 1987, S.214)

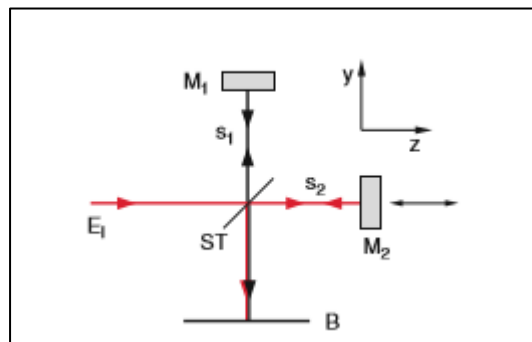


Abbildung 10: Versuchsaufbau – Michelson-Interferometer, M1 und M2: Spiegel, ST: Strahlteiler (Demtröder, 2013, S.306)

Eine ebene Welle  $E_1$  läuft in  $z$ -Richtung in den Versuchsaufbau. Der Strahlteiler ST teilt  $E_1$  in  $E_1$  und  $E_2$  auf, indem er einen Teil des Lichts in  $y$ -Richtung reflektiert und einen Teil in  $z$ -Richtung transmittiert.  $E_1$  wird an  $M_1$  reflektiert und trifft nach Transmission am Strahlteiler auf den Schirm B.  $E_2$  wird an  $M_2$  und an dem Strahlteiler reflektiert, mit  $E_1$  überlagert. (Demtröder, 2013, . 306)

Im Folgenden werden ideale ebene Wellen betrachtet. Für  $E_1$  und  $E_2$  gilt folgende Gleichung:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 \quad (14)$$

Fokussiert man die Welle nach der Überlagerung auf einen Detektor, so ergibt sich für die gemessene Intensität:

$$I \propto |E_1|^2 \frac{1}{2} (1 + \cos(2k(s_1 - s_2))) \quad (15)$$

(Gobrecht, 1987, S.214)

Die Intensität ist proportional zum Betragsquadrat des elektrischen Feldes ist (Demtröder, 2013, S. 197). Dieser Zusammenhang wird in Gleichung (15) genutzt.

In der Gleichung stehen  $s_1$  und  $s_2$  für die Längen der Interferometerarme (s. Abbildung 10) und  $k$  für die Wellenzahl.

Verändert man den Abstand zwischen Strahlteiler und einem der Spiegel, ergibt sich je nach Verhältnis von  $s_1$  und  $s_2$  konstruktive oder destruktive Interferenz. Gilt beispielsweise  $s_1 = s_2$ , so erhält man konstruktive Interferenz. Unterscheiden sich die Interferome-

terarmlänge um die Hälfte der Wellenlänge so erhält man destruktive Interferenz. (Gobrecht, 1987, S. 214)

Mit Hilfe des Michelson-Interferometers kann auf diese Weise äußerst genau die Wellenlänge von Licht bestimmt werden. Hierzu misst man die Intensitätsmaxima mit einem Photodetektor, während einer der Spiegel verschoben wird. Misst man pro Verschiebestrecke  $\Delta z$  eine Anzahl von  $N$  Intensitätsmaxima, so ergibt sich die Wellenlänge  $\lambda$  aus folgender Formel:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta z}{N} \quad (16)$$

(Demtröder, 2013, S. 306f)

### *Der Young'sche Doppelspaltversuch*

Erstmals wurde die Interferenz von Lichtwellen zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Thomas Young mit Hilfe des Doppelspaltexperiments beschrieben (Hecht, 2002, S.4). Dieser Doppelspaltversuch, der bereits in der Einleitung dieses Kapitel thematisiert wurde, wird in folgendem Abschnitt genauer beschrieben.

Im Versuch wird ein Doppelspalt mit einer ausgedehnten Lichtquelle beleuchtet. Nachdem Huygenschen Prinzip können beide Spalten als Ausgangspunkt je einer neuen Welle gesehen werden. Diese beiden neu entstandenen Wellen interferieren nun in dem Bereich zwischen Doppelspalt und Schirm (Demtröder, 2013, S.303).

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitel thematisiert wurde, ergibt sich ein Muster auf dem Schirm, das durch die Überlagerung der beiden Wellen entsteht (s. Abbildung 11).

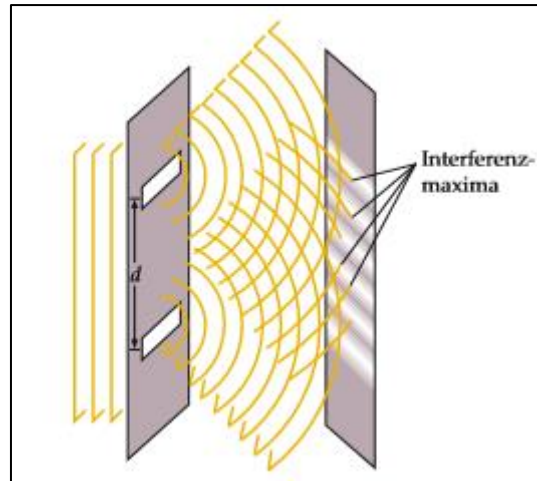


Abbildung 11: Doppelspaltexperiment mit Licht (Tipler et al., 2015, S.1091)

Dabei bestimmen die Amplituden, die Wegdifferenz und Phasen der Wellen in einem Punkt P auf dem Schirm, die Intensität an dieser Stelle. Bleibt die Phasendifferenz zeitlich konstant, kann man die Spalten als kohärente Lichtquellen betrachten. Die Interferenz der beiden Wellen bleibt in diesem Fall stabil. Um auch mit einer inkohärenten Lichtquelle kohärentes Licht hinter dem Doppelspalt zu erhalten, muss der Durchmesser der Lichtquelle  $b$  folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{D}{b} \quad (17)$$

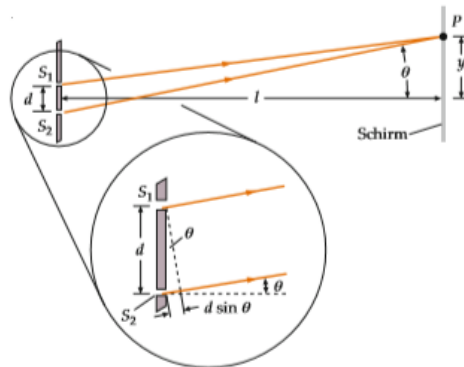
Hier bezeichnet  $d$  den Abstand der Spalten,  $D$  den Abstand von Doppelspalt und Schirm und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts, das von der Lichtquelle ausgesendet wird (Demtröder, 2013, S.304).

Auf dem Schirm kann ein Interferenzmuster beobachtet werden (s. Abbildung 12). Der Abstand  $D$  zwischen Doppelspalt und Schirm ist deutlich größer als  $d$ , daher kommt das Licht annähernd parallel am Schirm an (Tipler et al., 2015, S.1089f).



Abbildung 12: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch (Hecht, 2002, S.395)

Betrachtet man erneut einen Punkt P auf dem Schirm, wie in Abbildung 13 graphisch veranschaulicht wird, beträgt der Gangunterschied der beiden Teilwellen in P etwa  $d \sin \theta$  bei einem Spaltabstand  $d$ .



**Abbildung 13: Doppelspaltexperiment (Tipler et al., 2015, S.1091)**

Entspricht der Gangunterschied einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge  $\lambda$  so interferieren die Wellen an diesem Punkt des Schirms konstruktiv.

Für die Intensitätsmaxima erhält man demnach folgende Bedingung

$$d \sin(\theta_m) = m \lambda \quad (18)$$

Für die Intensitätsminima gilt

$$d \sin(\theta_m) = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (19)$$

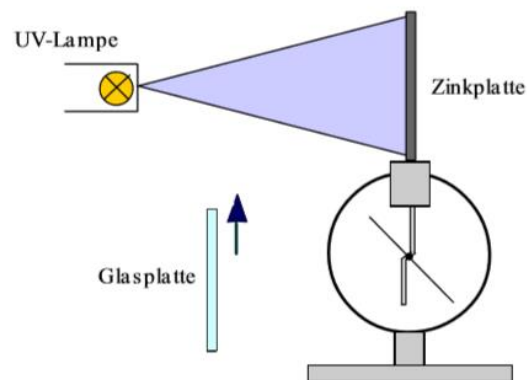
Wobei  $\theta_m$  den Winkel bezeichnet, bei dem das Minimum beziehungsweise Maximum  $m$ -ter Ordnung entsteht. (Tipler et al., 2015, S. 1090)

Die Beobachtung von Interferenz in Versuchen wie dem eben beschriebenen Doppelspaltexperiment ist ein zentrales Merkmal für das Wellenverhalten von Licht. (Wiesner, Müller, 2000, S.23) Auch andere Versuche wie beispielsweise der Fresnelsche Spiegelversuch bestätigen den Wellencharakter (Hecht, 2002, S.4ff). Doch gibt es einige Phänomene wie beispielsweise den Hallwachs Effekt, die so nicht erklärt werden können. Hiermit beschäftigt sich das folgende Kapitel. (Wiesner et al., 2000. S.7)

### *Der Teilchencharakter von Licht*

#### Der Hallwachs-Effekt

Betrachtet wird den in Abbildung 14 gezeigten Versuchsaufbau. Eine abgeschmirgelte Zinkplatte wird mit dem Licht einer Quecksilberdampfampe bestrahlt. Dieses Licht hat einen hohen ultravioletten Anteil. Die Zinkplatte wurde zuvor auf ein Elektroskop gesteckt und negativ aufgeladen. Unter der Bestrahlung entlädt sich das Elektroskop. Dieses Phänomen kann nicht beobachtet werden, wenn eine Glasplatte zwischen der Lichtquelle und der Zinkplatte in den Versuchsaufbau eingebracht wird. (Wiesner et al., 2000, S.7)



**Abbildung 14: Versuchsaufbau zum Hallwachs-Effekt (Wiesner et al., 2000, S. 7)**

Um das beobachtete Phänomen zu erklären, wurde angenommen, dass sich Elektronen durch die Bestrahlung mit dem ultravioletten Licht aus der Zinkplatte herauslösen und sich die Platte so entlädt. Durch das Einbringen der Glasplatte wird deutlich, dass nur Ultraviolettes Licht Elektronen auslöst. Im Gegensatz zu sichtbarem Licht kann ultraviolettes Licht Glas nicht passieren. (Wiesner et al., 2000, S.8)

Versucht man den beobachteten Effekt mit Hilfe des Wellencharakters von Licht zu erklären stößt man auf ein Problem. Die Wellentheorie besagt, dass die Elektronen von den einfallenden Lichtwellen zum Schwingen angeregt werden. Mit steigender Amplitude dieser Schwingung sollten die Elektronen sich leichter aus dem Metall lösen. Je größer die Intensität des einfallenden Lichts ist, desto größer wäre die elektrische Feldstärke und damit die Amplitude der Schwingung der Elektronen. Demnach sollten die Elektronen auch von sichtbarem Licht ausgelöst werden können, wenn die Intensität erhöht wird. Doch selbst bei starker Intensitätserhöhung entlädt sich die Zinkplatte nicht, solange sich die Glasplatte im Versuchsaufbau befindet. Ein neues Modell zur

Beschreibung der Natur von Licht musste entwickelt werden. (Wiesner et al., 2000, S.8f)

Die Deutung des Photoeffekts

Das Herauslösen der Elektronen aus der Metallplatte durch Licht nennt man äußeren Photoeffekt (Wiesner et al., 2000, S.8).

Im Gegensatz zur Wellentheorie wird Licht in dem neuen Modell als Vielzahl von Energiequanten betrachtet. Diese Quanten werden als Photonen bezeichnet. Es erklärt den Photoeffekt über einen Stoß zwischen Photon und Elektron, bei dem die gesamte Energie des Photons an das Elektron abgegeben wird. Mit Hilfe der zusätzlichen Energie verlässt das Elektron die Metallplatte. (Wiesner et al., 2000, S.8)

Aus der Deutung des Photoeffekts ergeben sich wichtige Eigenschaften der Photonen. Zum einen ist die Energie  $E$  eines Photons proportional zu der Frequenz  $f$  des Lichts. Denn die Fähigkeit der Photonen Elektronen aus der Metalloberfläche zu lösen nimmt mit steigender Frequenz des Lichts zu. Mit der Proportionalitätskonstante  $h$  ergibt sich

$$E = hf \quad (20)$$

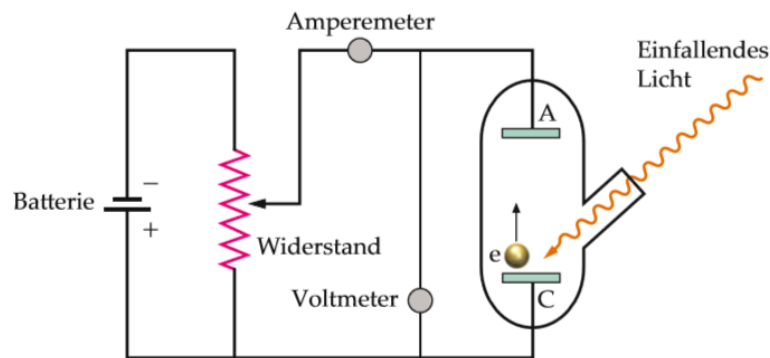
(Wiesner et al., 2000, S.9)

Es zeigte sich außerdem, dass die Energie des Elektrons nach Verlassen der Metalloberfläche etwas geringer ist, als die obige Formel angibt. Der Energieverlust lässt sich zum einen durch Stöße des Elektrons im Inneren der Metallplatte erklären. Zum anderen muss das Elektron zum Verlassen der Metallplatte eine Austrittsarbeit  $W_A$  verrichten, die von dem jeweiligen Metall abhängt. Für die kinetische Energie  $E_{kin}$  des Elektrons nach dem Verlassen der Metallplatte erhält man somit

$$E_{kin} = hf - W_A - W_S \quad (21)$$

$W_S$  bezeichnet hierbei den Energieverlust durch Stöße innerhalb des Metalls. Setzt man  $W_S = 0$  so erhält man den maximal möglichen Wert für die kinetische Energie des Elektrons. (Wiesner et al., 2000, S. 9f)

Um die obigen Aussagen experimentell zu prüfen und die Proportionalitätskonstante  $h$  aus Gleichung 20 kann folgender Versuchsaufbau verwendet werden (s. Abbildung 15). (Wiesner, 2000, S.10)



**Abbildung 15: Versuchsaufbau zum photoelektrischen Effekt (Tipler et al., 2015, S.1162)**

Im Versuch trifft Licht einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  auf eine Kathode C, die sich in einer Vakuumkammer befindet. Durch das eingestrahlte Licht werden Elektronen aus der Kathode C ausgelöst. Diese werden zur Anode A hin beschleunigt. Somit fließt ein Strom der mit Hilfe des Amperemeters gemessen werden kann. Dieser Strom ist proportional zur Anzahl der herausgelösten Elektronen. (Tipler et al., 2015, S.1162)

Es wird nun eine Gegenspannung an der Anode angelegt, die eine abstoßende Wirkung auf die ankommenden Elektronen hat. Je höher die angelegte Gegenspannung ist, desto höher muss die kinetische Energie der Elektronen sein, um zur Anode zu gelangen. Erhöht man die Gegenspannung soweit bis gerade keine Elektronen mehr zur Anode, also das Amperemeter keinen Strom mehr misst, so kann man die maximale kinetische Energie der herausgelösten Elektronen bestimmen. (Tipler et al., 2015, S. 1162)

Dieses Vorgehen wird als Gegenfeldmethode bezeichnet. Für diese maximale kinetische Energie  $E_{kin,max}$  gilt nun

$$E_{kin,max} = e \cdot U_G \quad (22)$$

Wobei  $U_G$  die angelegte Gegenspannung und  $e$  die Elementarladung bezeichnet. (Wiesner et al., 2000, S.10)

Nun kann die Gegenspannung für unterschiedliche Frequenzen des einfallenden Lichts bestimmt werden. Trägt man die Werte für die Gegenspannung nach der Frequenz an, so ergibt sich eine Gerade. Die Proportionalitätskonstante  $h$  entspricht der Steigung dieser Gerade. Die Konstante  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$  wird mit Planckschem Wirkungsquantum bezeichnet. (Wiesner et al., 2000, S.10f)



Bei gleicher Wellenlänge blieb die maximale kinetische Energie unverändert. Dies führte Einstein zu der Annahme, dass die Energie von Licht quantisiert ist. Ein Lichtquant wird als Photon bezeichnet. (Tipler et al., 2015, S.1163)

Aus der Energie eines Photons (s. Gleichung 20) und der Masse-Energie-Äquivalenz

$$E = m \cdot c^2 \quad (23)$$

Ergibt sich für die Masse  $m$

$$m = \frac{h \cdot f}{c^2} \quad (24)$$

Für den Impuls eines Photons gilt somit

$$p = m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} \quad (25)$$

Diese Existenz des Photonenimpulses sowie die quantisierte Übertragung von Energie an die Elektronen in den obigen Experimenten sprechen für das Teilchenmodell. Jedoch können Phänomene wie die Interferenz von Licht, wie sie am zuvor beschriebenen Doppelspaltexperiment beobachtet wurde, nicht über die Teilchennatur von Licht erklärt werden. (Wiesner et al., 2000, S. 13)

Licht zeigt somit in manchen Versuchen wie dem Doppelspaltexperiment Welleneigenschaften und in anderen wie beispielsweise dem Versuch zum Hallwachs-Effekt Teilcheneigenschaften. Für die klassische Physik bedeutet dies einen Widerspruch, da sich Teilchen nicht wie Wellen verhalten und umgekehrt Wellen keinen Teilchencharakter haben können (Tipler et al., 2015, S. 1172).

### *Der Welle-Teilchen-Dualismus*

Um die Natur von Licht genauer zu untersuchen, kann man ein Interferenzexperiment mit einzelnen Photonen durchführen. Um einzelne Photonen zu erhalten, wird hierbei Laserlicht durch Graufilter so stark abgeschwächt, dass ein Photonendetektor, ein CCD-Element, das aus mehreren Halbleiter-Detektorbausteinen besteht, einzelne Photonen misst. (Wiesner et al., 2000, S. 23ff)

Für das Interferenzexperiment kann ein Mach-Zehnder Interferometer (s. Abbildung 16) genutzt werden. Führt man das Experiment mit kontinuierlichem Laserlicht durch, so wird das Laserlicht von Strahlteiler 1 aufgespalten, sodass ein Strahl den Weg A und

der andere Weg B nimmt. Beide Strahlen werden an den jeweiligen Spiegeln so reflektiert, dass sie im Strahlteiler 2 wieder aufeinander treffen. Der Gangunterschied der beiden Teilstrahlen, führt zu einem Interferenzmuster, das auf dem Schirm zu erkennen ist. (Wiesner et al., 2000, S. 23f)

Das Mach-Zehnder-Interferometer kann im Allgemeinen für ähnliche Messungen gebraucht werden wie das bereits beschriebene Michelson-Interferometer (Gobrecht, 1987, S. 215).

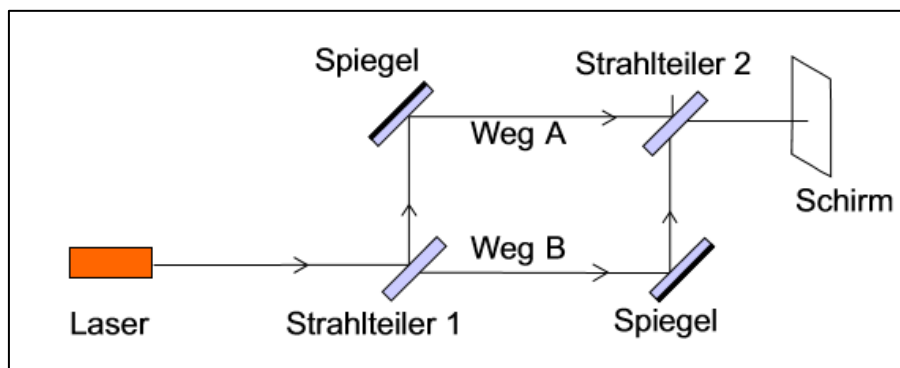


Abbildung 16: Versuchsaufbau des Mach-Zehnder-Interferometers (Wiesner et al., 2000, S. 24)

Führt man das Interferenzexperiment mit einzelnen Photonen durch, so misst der Photodetektor zunächst einzelne Ausschläge. Mit der Zeit bildet sich jedoch dasselbe Interferenzmuster aus, das man mit dem kontinuierlichen Laserlicht beobachten konnte. (Wiesner et al., 2000, S. 27)

Somit kann in diesem Experiment sowohl Welle- als auch Teilchencharakter beobachtet werden. Der Photonendetektor misst einzelne Ausschläge an den Detektorbausteinen. Eine Welle würde ihre Energie gleichmäßig abgeben und somit mehrere Detektorbausteine aktivieren. Somit könnte von Anfang an ein Interferenzmuster beobachtet werden. Nach einiger Zeit kann jedoch ein Interferenzmuster beobachtet werden, was charakteristisch für eine Welle ist. (Wiesner et al., 2000, S. 27)

Demnach ist es nicht möglich die beiden Modelle voneinander zu trennen. Eine Beschreibung von Licht muss sowohl den Wellen- als auch den Teilchencharakter enthalten. Dies bezeichnet der Welle-Teilchen-Dualismus. (Wiesner et al., 2000, S. 27)

Um die experimentellen Befunde zur Natur von Licht interpretieren zu können, wurde die Quantenphysik entwickelt (Tipler et al., 2015, S.1162).

### **De Broglie, die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation und die Schrödinger-gleichung**

Das letzte Kapitel hat gezeigt, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter aufweist. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus beschränkt sich jedoch nicht nur auf Licht, sondern kann auch bei Materie wie Elektronen oder ganzen Atomen beobachtet werden. Diesen Objekten würde man klassischer Weise mit Hilfe eines Teilchenmodells beschreiben. 1923 beschäftigte sich De Broglie erstmals mit dem Wellencharakter von Materie. (Wiesner et al., 2000, S. 39)

Für die Vermutung De Broglies, dass auch Materie Wellencharakter besitze, gab es zu dieser Zeit noch keinen Beweis (Tipler et al., 2015, S. 1167). Ein Experiment, das die Wellennatur von Materieteilchen bestätigt, wird im nächsten Kapitel diskutiert.

De Broglie stellte folgende Formel auf, die die Wellenlänge  $\lambda$  eines Elektrons berechnet.

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (26)$$

Hierbei bezeichnet  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $p$  den Impuls eines Elektrons. De Broglie vermutete, dass die obige Gleichung nicht nur die Wellenlänge von Elektronen sondern von Materie allgemein beschreibt. Da der Impuls makroskopischer Objekte weitaus größer ist als der eines Elektrons, sind die Wellenlängen von Objekten dieser Größenordnung zu klein, um Phänomene wie Beugung oder Interferenz zu beobachten. (Tipler et al., 2015, S. 1167)

Materieteilchen wie Elektronen kann somit eine Wellenlänge zugeordnet werden und wie im nächsten Kapitel genauer gezeigt wird, zeigen Elektronen in bestimmten Experimenten Welleneigenschaften wie Interferenz. Die nächsten Abschnitte beschäftigen sich mit der mathematischen Beschreibung von Quantenobjekten wie Elektronen.

Nach Wiesner et al. (2000, S. 82) liefert die Wellenfunktion eine Möglichkeit Quantenobjekte mit Hilfe der Mathematik quantitativ zu beschreiben. Elektronen können wie Licht zu Beginn des Kapitels über eine Wellenfunktion  $\psi(x,t)$  beschrieben werden. (Wiesner et al., 2000, S. 82)

Ist die Wellenfunktion eines Quantenobjektes bekannt, so kann man viele Informationen über sie erhalten. Beispielsweise können Aussagen über die Aufenthaltswahrscheinlichkeit an einem bestimmten Ort gemacht werden. (Wiesner et al., 2000, S.82)

Im Gegensatz zur klassischen Physik, die deterministisch ist, kann in der Quantenphysik keine genauen Aussagen über den Aufenthaltsort eines Teilchens getroffen werden, obwohl die Anfangsbedingungen bekannt sind. Beispielsweise kann in der klassischen Physik genau berechnet werden, an welchem Ort ein Ball landen wird, der mit einer bekannten Geschwindigkeit und in einem bekannten Winkel geworfen wurde. Wiederholt man den Wurf mit den gleichen Anfangsbedingungen, erhält man das gleiche Ergebnis. (Wiesner et al., 2000, S.36)

Den Unterschied zur Quantenphysik wird deutlich, wenn man beispielsweise das zuvor beschriebene Doppelspaltexperiment betrachtet. Jedes Photon, das den Doppelspalt passiert, hat zu Beginn des Experiments die gleichen Anfangsbedingungen. Trotzdem ist es nicht möglich vorherzusagen, an welcher Stelle des Schirms ein Photon auftreffen wird. Es können jedoch anhand des Interferenzmusters Aussagen über die Wahrscheinlichkeit getroffen werden mit der ein Photon auf einer bestimmten Stelle auftrifft. Betrachtet man eine große Anzahl von Photonen, die den Doppelspalt passieren, so kann die relative Häufigkeit, der Photonen an einem Ort, präzise vorausgesagt werden. (Wiesner et al., 2000, S. 36f)

Diese Wahrscheinlichkeit  $P(x,t)dx$  ein Teilchen in einem bestimmten Bereich  $dx$  zur Zeit  $t$  an dem Ort  $x$  zu finden, lässt sich wie folgt bestimmen

$$P(x, t)dx = |\psi(x, t)|^2 dx \quad (27)$$

(Tipler et al., 2015, S. 1170).

Dieser Zusammenhang geht auf Max Born zurück und wird die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation genannt (Wiesner et al., 2000, S. 50)

Je höher die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ort ist desto mehr Photonen treffen an diesem Ort auf den Schirm.  $P(x,t)$  bezeichnet eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die zur Beschreibung von Quantenobjekten dient. Über die Wahrscheinlichkeitsdichte kann die Verteilung von Quantenobjekten bestimmt werden. Allerdings ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichte selbst nicht trivial und wird somit über Wellenfunktion mit Hilfe der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation bestimmt. (Wiesner et al., 2000, S. 49f)

Um die Wellennatur von Licht zu repräsentieren, werden die Maxwellgleichungen zum Elektromagnetismus genutzt (s. Kapitel 2.1.2 Die Wellengleichung). Aus den Maxwellgleichungen kann die Wellengleichung hergeleitet werden. Für die mathematische Beschreibung von Materiewellen wie der Wellengleichung von Elektronen entwickelte Erwin C. Schrödinger die Schrödingergleichung. (Hecht, 2002, S.36)

Dabei handelt es sich um eine partielle Differentialgleichung:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x, t) + E_{pot} \psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) \quad (28)$$

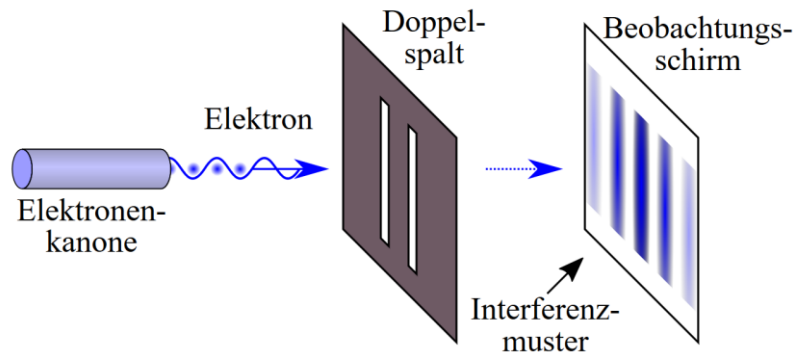
Hierbei bezeichnet  $\psi$  eine eindimensionale Wellenfunktion,  $E_{pot}$  die potentielle Energie und  $\hbar$  das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum. (Tipler et al., 2015, S.1170)

Die potentielle Energie  $E_{pot}$  wird oft auch mit  $V$  bezeichnet und beschreibt die physikalische Situation, die vorliegt (Wiesner et al., 2000, S. 94). Die Wellenfunktion eines Photons löst ebenfalls die Schrödingergleichung (s. Tipler et al., 2015, S.1179).

### **Elektronen als Quantenobjekte**

Wie zuvor bereits erwähnt kann De Broglies Vermutung, dass Materieteilchen wie Elektronen ebenfalls Wellencharakter haben, über Experimente bestätigt werden. Beispielsweise über Experimente in denen die Beugung oder Interferenz von Elektronen gezeigt werden kann. (Wiesner et al., 2000, S.39)

Im Doppelspaltexperiment kann der Wellencharakter von Licht nachgewiesen werden. Analog kann das Experiment mit Elektronen durchgeführt werden. Wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen statt mit Photonen durchgeführt, so bildet sich ebenfalls ein Interferenzmuster auf dem Schirm aus (s. Abbildung 17). (Wiesner et al., 2000, S.40f)



**Abbildung 17: Doppelspaltexperiment mit Elektronen**  
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit\\_de.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_de.svg))

Wie schon bei dem Versuch mit Photonen, kann die Interferenz der Elektronen mit dem Wellencharakter erklärt werden. Detektiert wird jedoch abermals ein Teilchen, da das Elektron wie zuvor das Photon seine gesamte Energie auf eine Stelle des Schirms überträgt. Somit zeigen die Elektronen sowohl Welle- als auch Teilcheneigenschaften. (Wiesner et al., 2000, S.41)

Dieser Nachweis des Welle-Teilchen-Dualismus von Elektronen gelang erstmals 1961, da es große Schwierigkeiten bei der Herstellung des Doppelspalts gab. Dessen Spaltbreite dürfte für die Realisierung des Experiments nur einen halben Mikrometer betragen. (Wiesner et al., 2000, S.41)

Das Doppelspaltexperiment kann inzwischen sogar mit ganzen Atomen und verschiedenen Molekülen durchgeführt werden. Auch in diesen Versuchen kann Interferenz beobachtet werden. (Wiesner et al., 2000, S.41)

### **2.1.3 Folgerungen und Beispiele im Zusammenhang mit dem Unterrichtsgang**

Im Verlauf des letzten Kapitels wurde der Welle-Teilchen-Dualismus von Licht und von Materie beschrieben. Alle diese Quantenobjekte zeigen demnach sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften.

Im folgenden Kapitel werden Phänomene und Anwendungen der Quantenphysik betrachtet, die für den beschriebenen Kurs relevant sind, jedoch im Zuge des letzten Kapitels noch nicht abgedeckt wurden. Im Zuge dessen wird zunächst das Komplementaritätsprinzip anhand des Quantenradierers näher beschrieben. Im Anschluss daran wird auf die wechselwirkungsfreie Quantenmessung und zwei Anwendungen der Quantenphysik eingegangen.

Ein Quantensystem kann beide Charaktere, Welle und Teilchencharakter, darstellen, jedoch nicht gleichzeitig. Im Doppelspaltexperiment kann beispielsweise keine Aussage darüber getroffen werden, welchen der Spalten ein Quantenobjekt durchquert hat. Diese Information, welchen Weg das Objekt genommen hat, wird mit Welcher-Weg Information bezeichnet. Besteht die Möglichkeit, die Welcher-Weg Information zu erhalten, verschwindet die Interferenz auf dem Schirm. Das Phänomen, dass Interferenz und Welcher-Weg Information nicht gleichzeitig erhalten werden können, nennt man Komplementaritätsprinzip. (Herzog, 1995, S.3034)

#### **Das Komplementaritätsprinzip**

Nach Herzog et al. (1995, S.3034) kann das Komplementaritätsprinzip durch folgendes Gedankenexperiment veranschaulicht werden. Ein Teilchen wird durch einen beweglichen Spalt, der sich vor einem Doppelspalt befindet, gesendet. Will man nun Informationen darüber erlangen, welchen Spalt das Teilchen gewählt hat, wird der Kontrast des entstandenen Interferenzmusters schwächer. Das Muster wird vollkommen verschwinden, sobald man den genauen Weg des Teilchens bestimmen kann. Hierbei reicht die Möglichkeit den Weg bestimmen zu können, um die Interferenz verschwinden zu lassen. Es ist demnach unmöglich, gleichzeitig Interferenz und eine Welcher-Weg Information zu erhalten.

Man konnte jedoch in anderen Experimenten beobachten, dass dieses Phänomen nicht irreversibel ist. Die Welcher- Weg Information kann „wegradiert“ werden, sodass erneut ein Interferenzmuster entsteht. Experimente dieser Art werden Quantenradierer genannt. Der Grundgedanke ist, den Detektor, der die Welcher-Weg Information bestimmen soll, selbst in ein Quantensystem umzugestalten. Dabei enthält der Quantenradierer verschiedene Quantensysteme die miteinander wechselwirken. Es gibt mehrere Möglichkeiten, diese Art von System aufzubauen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Polarisation von Licht zu verwenden. (Herzog, 1995, S. 3034)

Der Versuchsaufbau (s. Abbildung 18) enthält einen Kristall. Dieser wird von einem Laser bestrahlt.

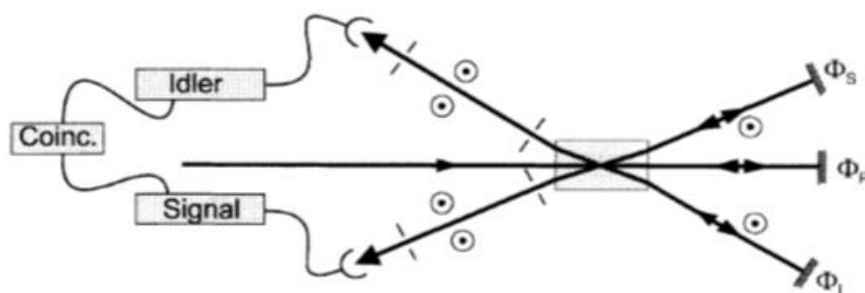


Abbildung 18: Versuchsaufbau – Quantenradierer (Herzog, 1995, S.3034)

Dies erzeugt Photonenpaare in dem Kristall. Leitet man diesen Laserstrahl erneut in den Kristall um, ergibt sich eine zweite Möglichkeit, dass Photonenpaare entstehen. Das Photonenpaar setzt sich aus einem sogenannten „signal“ und einem „idler“ Photon zusammen. Alle Photonen sind hierbei vertikal polarisiert. Die Photonen, die bei der ersten Bestrahlung des Kristalls entstehen, werden mit denen, die bei der zweiten Bestrahlung, durch den umgeleiteten Laser entstehen, überlagert. Die Photonen, die im ersten Prozess entstehen, werden im Folgenden als reflektiert bezeichnet, Photonen, die im zweiten Prozess entstehen, als direkt. (Herzog, 1995, S.3034f)

Zunächst können die direkten und reflektierten Photonen nicht unterschieden werden. Um diese Information zu erhalten, kann die Polarisation von Photonen genutzt werden. Hierbei ist der Versuch so gestaltet, dass die Polarisation der Photonen, je nachdem, in welchem Prozess sie erzeugt wurden, unterschiedlich ist (s. Abbildung 19). Die unterschiedliche Polarisation wird durch eine Polarisationsfolie hervorgerufen, die die Polarisationsrichtung von vertikal in horizontal ändert. Die Folie wird vor dem Spiegel platziert, an dem der Laserstrahl in den Kristall zurückreflektiert wird. Nun kann die Infor-



mation über eine Messung der Polarisation des „idler“ Photons erhalten werden. Es tritt keine Interferenz für „idler“ oder „signal“ auf, da die Information über den Entstehungsprozess des einen Photons automatisch die des anderen liefert. (Herzog, 1995, S. 3034f)

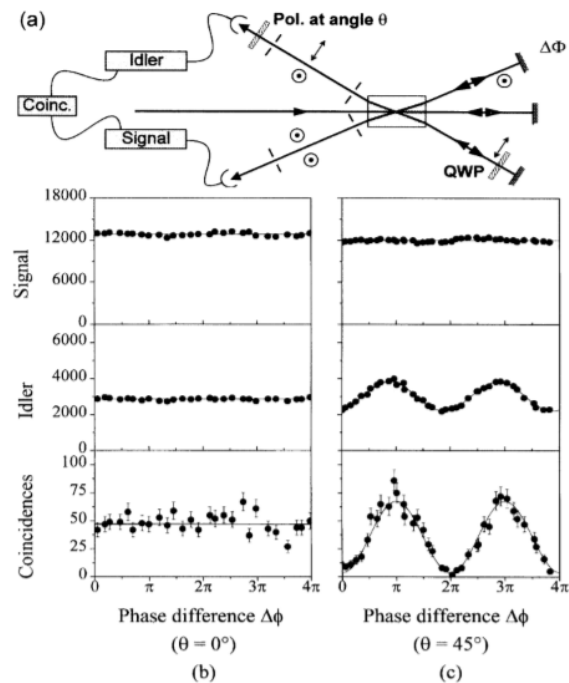


Abbildung 19: Versuchsaufbau – (b) Messung mit Polarisationsfolie, um Information zu erhalten. (c) Messungen im  $45^\circ$  Winkel, um Information über „idler“ Photon zu löschen. (Herzog, 1995, S.3035)

Die Information für das „idler“ Photon kann jedoch gelöscht werden. Misst man die Polarisation des „idler“ Photons im  $45^\circ$  Winkel, kann nicht festgestellt werden, ob es zuvor vertikal (Photon entstand im ersten Prozess) oder horizontal (Photon entstand im zweiten Prozess) polarisiert war. Es kann erneut Interferenz der „idler“ Photonen beobachtet werden. Die Interferenz der „signal“ Photonen kann auf diese Weise nicht wiederhergestellt werden. (Herzog, 1995, S. 3035)

## Die wechselwirkungsfreie Quantenmessung

Ein weiteres Phänomen, das den wesentlichen Inhalt eines Experiments des Quantenphysikkurses darstellt, ist die wechselwirkungsfreie Quantenmessung. Dieses Phänomen der Quantenphysik wird zunächst anhand folgenden Gedankenexperiments erläutert.

### *Ein Gedankenexperiment*

Ein Gegenstand kann nur dann beobachtet werden, wenn er von mindestens einem Photon getroffen wird. Diese Aussage von Denis Gabor scheint selbstverständlich. Und doch trifft sie auf dem Gebiet der Quantenmechanik nicht zu. Verschiedene Experimente zeigen, wie man ohne Wechselwirkung mit einem Photon Informationen über das Vorhandensein eines Körpers erlangt (Kwiat, 1997, S.42).

Nach Kwiat (1997, S.42f) kann man sich das Prinzip der wechselwirkungsfreien Quantenmessung vereinfacht wie in folgendem Gedankenexperiment vorstellen. Die Ausgangslage ist eine abgewandelte Version des Hütchenspiels. Eine Murmel, die bei Kontakt mit einem Photon zu Staub zerfällt, befindet sich unter einem von zwei identischen, Licht undurchlässigen Hütchen (s. Abbildung 20).



**Abbildung 20: Hütchenspiel (Kwiat, 1997, S.42)**

Unter welchem Hütchen sich die Murmel befindet, ist unbekannt. Ziel ist es, den Aufenthaltsort der Murmel zu bestimmen, ohne sie zu zerstören. Nun können zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall wird das Hütchen angehoben, unter dem sich die Murmel befindet. Damit wird die Murmel zerstört und man kann anhand des Staubes erkennen, dass sich die Murmel unter dem Hütchen befunden hatte. Im zweiten Fall wird das Hütchen ohne Murmel angehoben. Nun kann mit Sicherheit gesagt werden, dass sich die Murmel unter dem anderen Hütchen befindet. Man hat somit Informationen über den Aufenthaltsort der Murmel erhalten, obwohl keine Wechselwirkung mit einem Photon aufgetreten ist. (Kwiat, 1997, S.42f)

*Die Superbombe von Elitzur und Vaidman (1993)*

In einem abgeänderten Gedankenexperiment betrachteten Elitzur und Vaidman anstelle einer Murmel eine Superbombe. Für die Detonation dieser Superbombe sollte ein einziges Photon genügen. Hierbei galt es herauszufinden, ob diese Superbombe vorhanden ist. (Kwiat, 1997, S.43)

Die Lösung die Elitzur und Vaidman liefern wird in folgendem Abschnitt beschrieben. Diese ist nur 50% aller Fälle erfolgreich, räumt einem jedoch zumindest eine Gewinnchance ein (Kwiat, 1997, S.43).

Betrachtet man zunächst erneut ein Doppelspaltexperiment mit Photonen. Wie bereits in letztem Kapitel beschrieben ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in einem der Intensitätsmaxima auf den Schirm trifft, höher als an den anderen Stellen. Aus dem vorigen Kapitel ist zudem bekannt, dass die Interferenz verschwindet sobald man Informationen über den Weg der Photonen erhält. Um die Interferenz zu gewährleisten, benötigt man demnach mindestens zwei ununterscheidbare Wege, die die Photonen nehmen können. (Kwiat, 1997, S. 43)

Für das Gedankenexperiment von Elitzur und Vaidman wurde ein Mach-Zehnder Interferometer verwendet wie es bereits kurz in Kapitel 2.1.2 beschrieben wurde. Die Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers. Er setzt sich aus einem Laser, zwei Strahlteilern, zwei Spiegeln und zwei Schirmen zusammen. (Kwiat, 1997, S.43)

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Strahlteiler die Strahlen im Verhältnis 50-50 teilen (Gobrecht, 1987, S.215f). Sind die Interferometerarme des Mach-Zehnder-Interferometers (s. Abbildung 21) gleich lang, so kann man konstruktive Interferenz auf dem rechten Schirm und destruktive Interferenz auf dem oberen Schirm beobachten (Gobrecht, 1987, S. 215).

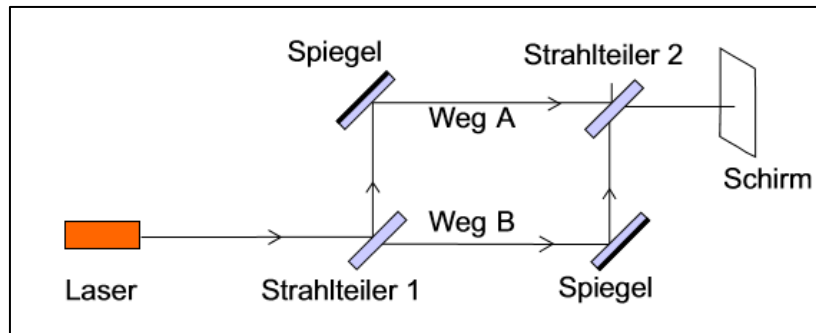


Abbildung 21: Versuchsaufbau des Mach-Zehnder-Interferometers (Wiesner et al., 2000, S. 24)

Dieses Phänomen wird in folgenden Abschnitt kurz erläutert.

Generell gilt, dass „[b]ei der Reflexion am optisch dichteren Medium ... für die zur Einfallsebene senkrechte Komponente ein Phasensprung von  $\pi$  auftritt.“ (Demtröder, 2013, S.239)

Im Folgenden werden die Phasenverschiebungen, die durch Reflexion an den Spiegeln entstehen vernachlässigt, da alle Wellen genau einmal an einem der beiden Spiegel reflektiert werden und diese Reflexion für den Phasenunterschied somit keine Rolle spielt.

Es tritt für jeden Strahl der an einem Strahlteiler reflektiert wird eine Phasenverschiebung um  $\pi$  auf. Betrachtet man nun die Welle, die an oberen Schirm ankommt. Die resultierende Welle entstand aus Überlagerung der Wellen aus Weg A und Weg B. Die Teilwelle, die den Weg A durchlief, wurde hierbei zweimal an einem Strahlteiler reflektiert. Die Reflexion am ersten Strahlteiler führte zu einer Phasenverschiebung von  $\pi$ . Aufgrund der Ausrichtung des zweiten Strahlteiler, kommt es bei der Reflexion an diesem zur keiner Phasenverschiebung. Der zweite Strahlteiler, ist so ausgerichtet, dass die ankommende Welle aus Weg A erst durch eine optisch dichtere Schicht transmittiert und darauf an einem optisch dünneren Medium reflektiert wird. Hierbei tritt nach Demtröder (2013, S. 239) keine Phasenverschiebung auf. Insgesamt ist diese Welle also um  $\pi$  verschoben. Die Welle aus Weg B wurde dagegen nie an einem Strahlteiler reflektiert. Somit findet auch keine Phasenverschiebung statt. Die Teilwellen sind somit um ein ganzzahliges ungerades Vielfaches von  $\pi$  verschoben was nach Kapitel 2.1.2 zu destruktiver Interferenz führt.

Man führt nun dieselbe Überlegung für die Welle am rechten Ausgang des Interferometers durch. Diese Welle resultiert aus den Wellen aus Weg A und Weg B, die jeweils genau einmal an einem Strahlteiler reflektiert wurden. Somit weisen beide Wellen die

gleiche Phasenverschiebung auf. Sie sind demnach in Phase was nach Kapitel 2.1.2 zu konstruktiver Interferenz führt.

Es wird eine ebene Lichtwelle betrachtet. Falls das Licht unterschiedlich lange Wegstrecken zwischen Strahlteiler 1 und Strahlteiler 2 zurücklegt, kommt es zu einer Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen den beiden Teilwellen:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta l}{\lambda} 2\pi \quad (29)$$

wobei  $\Delta l$  die Wegdifferenz zwischen den Interferometerarmen und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts bezeichnet (Gobrecht, 1987, S.215).

Betrachtet man die beiden Wellen an den beiden Ausgängen, so ergibt sich für das Feld der Welle auf dem rechten Schirm  $E^{(r)}$

$$E^{(r)} = E^{(i)} \cos(\Delta\varphi) \quad (30)$$

Und für das Feld der Welle vor dem oberen Schirm  $E^{(o)}$

$$E^{(o)} = E^{(i)} \sin(\Delta\varphi) \quad (31)$$

(Gobrecht, 1987, S. 215)

Wobei  $E^{(i)}$  die Amplitude der einfallenden Welle darstellt.

Die Gleichungen (32) und (33) veranschaulichen den Zusammenhang zwischen der Intensität am rechten Schirm  $I^{(r)}$  und am oberen Schirm  $I^{(o)}$ , die sich aus dem Betragsquadrat der Wellengleichung ergibt, und der Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$ .

$$I^{(r)} \sim \cos^2(\Delta\varphi) \quad (32)$$

$$I^{(o)} \sim \sin^2(\Delta\varphi) \quad (33)$$

(Gobrecht, 1987, S. 215).

Beträgt die Phasenverschiebung beispielsweise  $\pi$ , so ist die Intensität am oberen Schirm  $I^{(o)}$  Null. Die Wellen interferieren destruktiv.

Zurück zu dem ursprünglichen Gedankenexperiment von Elitzur und Vaidman.

Zunächst wird erneut eine Murmel betrachtet, die sobald sie mit einem Photon wechselwirkt zerstört wird. Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus dem oben beschriebenen Mach-Zehnder-Interferometer. Die Schirme wurden durch Photonendetektoren ersetzt. Gelangt ein Photon an einen Detektor, so leuchtet dieser auf. Die Murmel befindet sich in Weg A. Es wird ein einzelnes Photon in den Aufbau gesendet. Da die

Wege nun unterscheidbar sind tritt keine Interferenz auf. Das Photon verhält sich wie ein Teilchen. Der erste Strahlteiler reflektiert oder transmittiert Photonen zufällig. Das Photon durchläuft also entweder Weg A oder Weg B. Nimmt es Weg A so wird die Murmel zerstört. Nimmt es jedoch Weg B so gelangt das Photon zum zweiten Strahlteiler. Da der Strahlteiler einzelne Photonen zufällig reflektiert oder durchlässt, leuchtet entweder der obere oder der rechte Photonendetektor auf. (Kwiat et al., 1997, S.43f)

Führt man das Experiment durch ohne zu wissen, ob sich die Murmel in dem Aufbau befindet, ergeben sich demnach vier Fälle. Im ersten Fall befindet sich keine Murmel im Aufbau. In diesem Fall leuchtet der rechte Detektor auf, da die Wellen am rechten Ausgang konstruktiv interferieren. Befindet sich die Murmel in Weg A so ergeben sich drei weitere Fälle, die bereits oben beschrieben wurden. Wird das Photon am Strahlteiler reflektiert, so wird die Murmel zerstört. Wird das Photon transmittiert, leuchtet entweder wie im Fall 1 der rechte Detektor auf oder es leuchtet der obige Detektor auf. Beide Ereignisse haben hierbei eine Wahrscheinlichkeit von 50%. Nur falls der obere Detektor aufleuchtet kann sicher gesagt werden, dass sich keine Murmel in dem Aufbau befindet. In 50% aller Fälle wurde die Murmel im Aufbau zerstört werden. (Kwiat, 1997, S. 43f)

Überträgt man das Gedankenexperiment auf den im Schülerlabor verwendeten Kontext, so entspricht die Anwesenheit der Murmel einer scharfen Bombe, die durch die Wechselwirkung mit einem Photon detoniert. Die Abwesenheit entspricht einem Blindgänger. Befindet sich ein Blindgänger im Versuchsaufbau, so sind die Wege erneut ununterscheidbar, da der Blindgänger nicht mit dem Photon wechselwirkt. Es tritt Interferenz auf. Ein Überblick über die möglichen Abläufe findet sich in Abbildung 22.

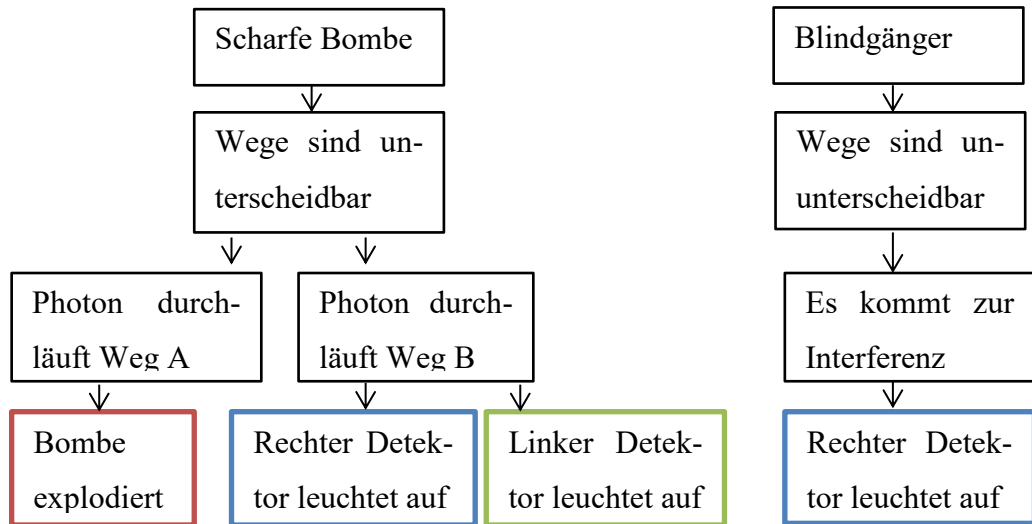


Abbildung 22: Überblick

Im Schülerlabor führen die Lernenden das Experiment an einem Michelson-Interferometer durch. Eine ausführliche Beschreibung aller Schülerversuche findet sich in Kapitel 2.2.5.

Die letzten Abschnitte dieses Kapitels beschäftigen sich mit zwei Anwendungen der Quantenphysik, der optischen Pinzette und der Quantenkryptographie. Beide Anwendungen finden sich im Zuge je eines Experiments im Kurs wieder.

### Die optische Pinzette

Die optische Pinzette ist ein Instrument, mit dessen Hilfe man Moleküle oder Atome unter einem Mikroskop festhalten und gezielt verschieben kann. Die Teilchen werden dabei durch einen negativen Strahlungsdruck festgehalten, der aufgrund eines axialen Intensitätsgradienten entsteht. (Ashkin, Dziedzic, Bjorkholm & Chu, 1985, S. 288)

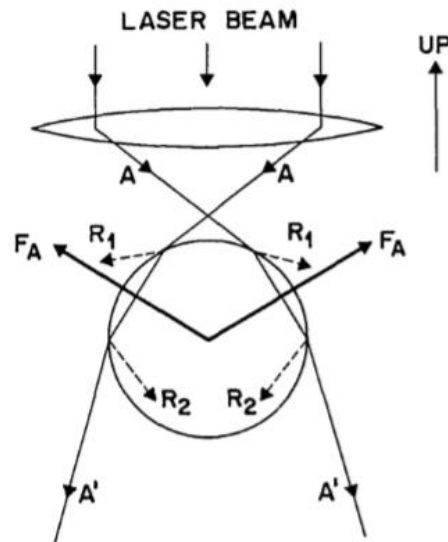
Dieses Phänomen soll im Folgenden näher erläutert werden.

Viele optische Fallen basieren auf der Streuung von Licht und Gradientenkräften. Dabei ist die Streukraft proportional zu Lichtintensität und deutet in Richtung des einfallenden Lichts. Die Gradientenkraft ist hingegen proportional zum Intensitätsgradienten und zeigt in Richtung desselbigen. (Ashkin et al., 1985, S.288)

Der Grundgedanke ist es, einen einzigen stark fokussierten Laserstrahl für die optische Falle zu verwenden, in dem die axiale Gradientenkraft so stark ist, dass sie die axiale

Stabilität dominiert. Die Abbildung 23 zeigt die Streuung eines fokussierten Laserstrahls an einem Teilchen. Das Teilchen hat einen Durchmesser von etwa 10 Mikrometern. (Ashkin et al., 1985, S. 288)

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben haben Photonen, obwohl sie keine Masse haben, einen Impuls.



**Abbildung 23: Kräfte auf ein etwa 10 Mikrometer großes Teilchen in einer optischen Falle (Ashkin et al., 1985, S. 289)**

Der Großteil des Impulsübertrags zwischen dem einfallenden Licht und dem Teilchen übertragen findet aufgrund der Streuung des Lichts  $A'$  an dem Teilchen statt.  $R_1$  und  $R_2$  stellen Oberflächenreflexionen dar. Durch die diese Reflexionen findet weniger Streuung statt. Die Kraft, die durch die Brechung des Laserstrahls entsteht wird in Abbildung 23 mit  $F_A$  bezeichnet. Es ergibt sich insgesamt eine Kraft in Richtung des Laserfokus. (Ashkin et al., 1985, S. 288)

Neben der optischen Pinzette ist die Quantenkryptographie eine weitere Anwendung der Quantenphysik, die im Zuge eines Experimentes des Kurses thematisiert wird.



## **Quantenkryptographie**

In diesem Kapitel bezeichnet Alice immer den Sender einer Nachricht, Bob den Empfänger und Eve einen Lauscher.

Mit Hilfe der Quantenkryptographie können Nachrichten derart verschlüsselt werden, dass sie für Außenstehende keinerlei Bedeutung mehr haben und somit unlesbar sind. (Ekert, 1991, S. 661)

Zunächst wird ein klassisches Kryptographieverfahren näher erläutert. Im Versuch zur Quantenkryptographie des Kurses wird dieses Verfahren genutzt, um die Nachrichten zu verschlüsseln.

### *Das One-Time Pad*

Eine Möglichkeit Nachrichten zu verschlüsseln ist das One –Time Pad. Hierbei handelt es sich um ein beweisbar sicheres Kryptographieverfahren. Es kann in drei Schritte unterteilt werden. (Homeister, 2015, S.173)

Im ersten Schritt wird ein Schlüssel generiert. Dieser besteht aus einer Folge von Nullen und Einsen, sogenannten Bits. Diese Bits der Folge sind zufällig und unabhängig. Die Bits können beispielsweise durch Münzwurf erzeugt werden. Der Schlüssel ist Alice und Bob bekannt. (Homeister, 2015, S. 173)

In der nächsten Stufe wird eine Nachricht verschlüsselt. Die zu versendende Nachricht wird hierzu in einen Binärcode umgewandelt. Der Schlüssel und die Nachricht werden binäraddiert. (Homeister, 2015, S.173)

Die Nachricht kann beispielsweise mit der Tabelle aus Abbildung 24 umgewandelt werden.

A	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	1
C	0	0	0	1	0
D	0	0	0	1	1
E	0	0	1	0	0
F	0	0	1	0	1
G	0	0	1	1	0
H	0	0	1	1	1
I	0	1	0	0	0
J	0	1	0	0	1
K	0	1	0	1	0
L	0	1	0	1	1
M	0	1	1	0	0
N	0	1	1	0	1
O	0	1	1	1	0
P	0	1	1	1	1
Q	1	0	0	0	0
R	1	0	0	0	1
S	1	0	0	1	0
T	1	0	0	1	1
U	1	0	1	0	0
V	1	0	1	0	1
W	1	0	1	1	0
X	1	0	1	1	1
Y	1	1	0	0	0
Z	1	1	0	0	1

Abbildung 24: Binärdarstellung des Alphabets (Thorlabs. (2017). Quantenkryptografie - Analogieversuch: Handbuch. Verfügbar unter [https://www.thorlabs.com/drawings/6019ae92e410f318-729EA5F9-D34E-5427-AF37D4A532EC338B/EDU-QCRY1\\_M-GermanManual.pdf](https://www.thorlabs.com/drawings/6019ae92e410f318-729EA5F9-D34E-5427-AF37D4A532EC338B/EDU-QCRY1_M-GermanManual.pdf) , S. 45)

Alice sendet die Folge von Bits, die sie aus der Binäraddition erhalten hat, an Bob. Im letzten Schritt wendet Bob erneut den Schlüssel mit Binäraddition auf die empfangenen Bits an und erhält die ursprüngliche Nachricht (s. Abbildung 25). (Homeister, 2015, S.173)

Wort	T	E	S	T																		
Wort binär	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	
	+																					
Schlüssel (zufällig)	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1		
Verschl. Nachricht	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0		
	+																					
Schlüssel (wie oben)	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1		
Wort binär	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1		
Wort	T	E	S	T																		

Abbildung 25: Beispiel für eine Verschlüsselung durch das One-Time Pad (Thorlabs, 2017, S. 10)

Bei der Anwendung dieses Verfahrens müssen folgende Voraussetzungen gelten um Sicherheit zu garantieren:

- Der erzeugte Schlüssel muss zufällig sein

- Der Schlüssel ist nur dem Sender und Empfänger bekannt
- Der Schlüssel darf nie ein zweites Mal verwendet werden

(Homeister, 2015, S. 173)

Ohne Kenntnis des Schlüssels kann die Nachricht nicht wiederhergestellt werden (Homeister, 2015, S. 173). Ein Lauscher, Eve, kann ohne die Kenntnis des Schlüssels nicht nachvollziehen, ob beispielsweise das Bit 0 aus der Binäraddition von 0 und 0 oder 1 und 1 entstanden ist. Das One-Time Pad hat somit per se nichts mit Quantenphysik zu tun.

### *Die Rolle der Quantenphysik*

Will man eine Nachricht abhörsicher übertragen, ergibt sich folgendes Problem. Digitale Kommunikation kann immer überwacht und kopiert werden. Wird die Information jedoch in Quantenzuständen übertragen umgeht man dieses Problem. Quantenzustände wie beispielsweise die Polarisationsrichtung von Photonen können nicht kopiert werden, ohne dass ein Lauscher die Zustände abändert. Der Lauscher kann anhand dieser Änderungen entdeckt werden. (Bennet & Brassard, 2014, S. 7)

Polarisiertes Licht kann erzeugt werden, indem Laserlicht durch einen Polarisationsfilter gesendet wird. Die Orientierung des Filters bestimmt dabei die Polarisationsrichtung des Laserlichts. Aus diesem polarisiertem Laserlicht können einzelne polarisierte Photonen gewonnen werden. Wird ein Photon nacheinander durch zwei Polarisationsfilter gesendet, unterscheidet man folgende Fälle. Sind die Ausrichtungen der Filter parallel, so wird das Photon transmittiert, sind die Ausrichtungen der Filter senkrecht zueinander, wird es absorbiert. In jedem anderen Fall kann das Photon mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entweder absorbiert oder transmittiert werden. Es verhält sich nicht mehr deterministisch. (Bennet et al., 2014, S. 7f)

Transmittiert ein Photon durch einen zweiten Filter hat es zudem alle Informationen des ersten Filters verloren und hat die Polarisationsrichtung des zweiten Filters. Somit ist es zudem nicht mehr möglich Informationen über den ersten Zustand zu erhalten. Auch das Klonen von Photonen ist keine Möglichkeit Informationen zu erhalten, da Photonen nicht geklont werden können. Das Klonen würde Grundprinzipien der Quantenmechanik widersprechen. (Bennet et al., 2014, S. 8)

Quantenmechanische Zustände können als Vektoren der Länge 1 im Hilbertraum dargestellt werden. Jede Messung eines Zustandes verändert diesen Zustand. Der Hilbertraum eines polarisierten Photons ist zweidimensional. Der Zustand des Photons kann somit als Linearkombination zweier Einheitsvektoren dargestellt werden. Beispielsweise können folgende Vektoren verwendet werden

$$r_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, r_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Man spricht auch von der geradlinigen Basis des Hilbert Raums.  $r_1$  steht für ein horizontal ( $0^\circ$ ) polarisiertes,  $r_2$  ein vertikal ( $90^\circ$ ) polarisiertes Photon. Eine alternative Basis ist die diagonale Basis

$$d_1 = \begin{pmatrix} 0,707 \\ 0,707 \end{pmatrix}, \quad d_2 = \begin{pmatrix} 0,707 \\ -0,707 \end{pmatrix}$$

Wobei  $d_1$  ein um  $45^\circ$  polarisiertes Photon und  $d_2$  ein um  $135^\circ$  polarisiertes Photon darstellt. (Bennet et al., 2014, S. 8)

Bevor wichtige Informationen über polarisierte Photonen versendet werden, werden eine Reihe zufälliger Bits übertragen. Alice und Bob können sich daraufhin über eine öffentliche Leitung austauschen und die Bits vergleichen. War zuvor ein Lauscher, Eve, anwesend, können sie diesen durch Vergleich der gesendeten und empfangenen Bits mit hoher Wahrscheinlichkeit entdecken. (Bennet et al., 2014, S. 9)

Beispielsweise wählt ein Sender Alice ein zufälliges Bit und eine zufällige Reihe der zuvor beschriebenen Polarisationsbasen (geradlinig oder diagonal). Sie sendet eine Reihe der Bits in den jeweiligen Basen an Bob. Jedes Photon repräsentiert ein Bit in einer Basis. Bob entscheidet zufällig für jedes Photon in welcher Basis er misst. Jedes Ergebnis interpretiert er dann als 1 oder 0. Misst Bob in der falschen Basis, erhält er wie bereits zuvor beschrieben ein zufälliges Ergebnis und alle bisherigen Informationen werden gelöscht. Bob und Alice gleichen nun über eine öffentliche Leitung ab, bei welchen Bits sie die gleiche Basis gewählt hatten. Wurde die Messung nicht durch Eve gestört, so treten beim Vergleich dieser Bits keine Unstimmigkeiten auf. (Bennet et al., 2014, S. 9)

Wird ein Lauscher entdeckt, wird die Messung verworfen und diese erste Phase der Bitübertragung wiederholt bis keine Unstimmigkeiten mehr auftreten. Weißt der Abgleich der Quantenübertragung keine Störungen auf, einigen sich Alice und Bob wichtige In-

formationen, die zuvor mit Hilfe des One-Time Pads verschlüsselt wurden, zu übertragen. (Bennet et al., 2014, S.9)

Eine Übersicht über verschieden, ungestörter Übertragungen zwischen Alice und Bob findet sich in der folgenden Abbildung (26).

Alice			Bob				Basen gleich?
Basis	Bit	=> Winkel	Basis	Winkel	Detektor „0“	Detektor „1“	
+	0	0°	+	0°	100%	0%	Ja
+	1	90°	+	0°	0%	100%	Ja
x	1	45°	+	0°	50%	50%	Nein
x	0	-45°	+	0°	50%	50%	Nein
+	0	0°	x	45°	50%	50%	Nein
+	1	90°	x	45°	50%	50%	Nein
x	1	45°	x	45°	100%	0%	Ja
x	0	-45°	x	45°	0%	100%	Ja

Abbildung 26: Übersicht über verschiedene Fälle (Thorlabs, 2017, S. 14)

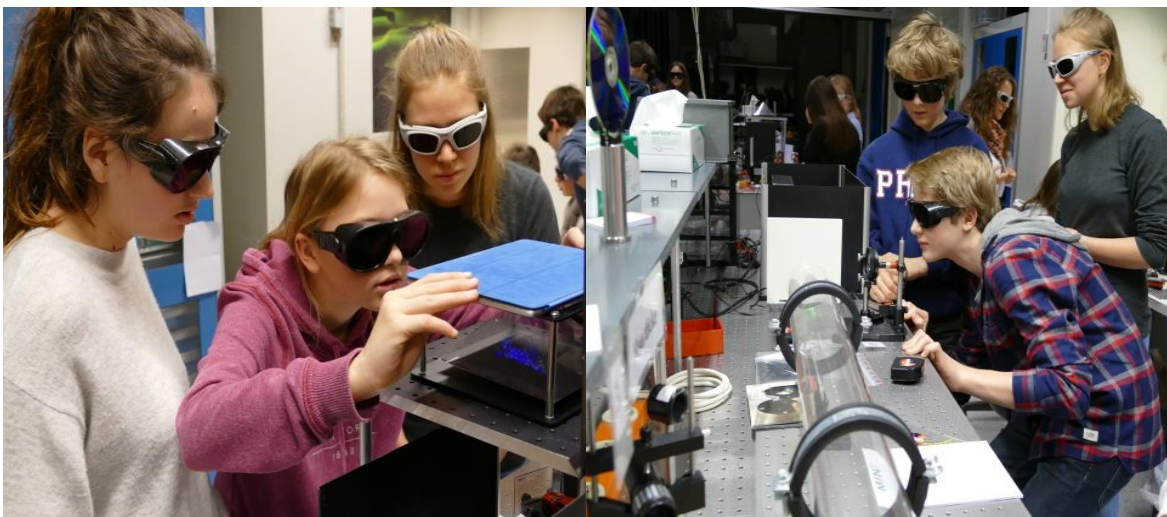
## 2.2 Praktischer Teil

Der praktische Teil beschäftigt sich mit der Planung und Umsetzung des Quantenphysikkurses. Neben dem Ablauf des Kurses, den Versuchsanleitungen, den Tests und den Schulklassen wird das PhotonLab, das Schülerlabor in dem der entworfene Kurs durchgeführt wird, vorgestellt.

### 2.2.1 Das PhotonLab

Das Schülerlabor zur Photonik ist eine Einrichtung der LMU München, des Max Planck Instituts für Quantenoptik (MPQ) und des Munich Center of advanced Photonics (MAP). Es wurde 2011 gegründet und befindet sich im MPQ in Garching. Das Labor kann von Schulklassen ab der 9. Klasse Gymnasium besucht werden. Jährlich experimentieren ungefähr 2000 Schülerinnen und Schüler im Schülerlabor. Ein Besuch unterteilt sich in folgende Abschnitte.

Nach der Ankunft im Schülerlabor erhält die Klasse einen Vortrag zum Thema Wellenlehre und Quantenphysik durch die Leitung des PhotonLabs. Der einstündige Vortrag wird von einer Präsentation begleitet, die mehrere Animationen und Filme enthält.



**Abbildung 27: Schülerinnen und Schüler beim Experimentieren im PhotonLab**

Im Anschluss findet eine Laborführung statt, die den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in den Alltag der Wissenschaftler im MPQ gibt.

Danach begeben sich die Lernenden in das PhotonLab, wo sie zunächst einen ausführlichen Vortrag zur Lasersicherheit erhalten. Anschließend können die Schülerinnen und Schüler in kleinen Gruppen je nach Klassengröße die zahlreichen Experimente im Schü-

lerlabor durchführen. Hierzu erhalten sie ein Tablet, das eine ausführliche Anleitung zu jedem der Versuchsaufbauten enthält. Im Allgemeinen steht den Lernenden eine Experimentierzeit von eineinhalb Stunden zur Verfügung. Bei Fragen können sie sich jederzeit an die Leitung des Schülerlabors wenden. Im Schülerlabor finden die Lernenden Experimente zur Optik und Photonik (s. Anhang A5). Auf Wunsch wird zudem eine Demonstration eines Femtosekundenlasers gezeigt.

Falls eine Schulklasse aus mehr als 20 Schülerinnen und Schülern besteht, wird sie geteilt. Ein genauer Ablauf für Klassen dieser Größe findet sich in Abbildung 28. Die Gruppe, die sich gerade nicht im PhotonLab befindet, hat die Möglichkeit das Campus Quiz gemeinsam mit ihrer Lehrkraft zu bearbeiten oder, falls zuvor besprochen, an einer größeren Laborführung teilzunehmen.

Zeit	Gruppe A	Gruppe B
9:30-10:30 Uhr	Einführung	
10:30-12:00 Uhr	Laborführung, Campus-quiz, Mittagspause	PhotonLab
12:00-13:30 Uhr	PhotonLab	Laborführung, Campus-quiz, Mittagspause

Abbildung 28 : Überblick über den Ablauf des Besuches für große Klassen

Im Zuge des hier beschriebenen Quantenphysikkurses wurde die Experimentierphase geändert. Eine genauere Beschreibung der Änderungen findet sich im nächsten Kapitel. Zudem war als Besonderheit eine schulische Vor- und Nachbereitung des Besuches vorgesehen, in denen sich die Lernenden mit ihren jeweiligen Experimenten ausführlich beschäftigen und eine kurze Präsentation zu ihrem Versuch in der Klasse vortragen.

### 2.2.2 Ablauf des Quantenphysikkurses

Um die Einbettung des Kurses in den Unterricht der 10. Klassen gewährleisten zu können, wurde der Kurs in drei Phasen unterteilt. Zwei davon, die Vorbereitungs- und die Nachbereitungsphase, finden in der Schule statt. Durch die Einbettung des entworfenen Kurses, sollten die Lernenden mehr Zeit zur Verfügung haben, sich mit ihren ausgewählten Experimenten zu beschäftigen. Zudem sollte die Vor- und Nachbereitung der Inhalte im Unterricht zu einem messbaren Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler führen.

#### Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase sollte den Schülerinnen und Schülern helfen, sich auf den Besuch vorbereiten zu können und sich für einen der Versuche zu entscheiden. Die Lehrkräfte erhielten im Voraus eine E-Mail, der sie den Verlauf der Unterrichtsstunde und verschiedene Materialien entnehmen konnten. Die Materialien bestanden aus einer Folienvorlage mit einer Übersicht und kurzen Beschreibung aller Versuche, die nach Komplexität geordnet waren. Zudem sind erste Materialien zu jedem Versuch beigelegt worden.

Der Ablauf der Unterrichtsstunde vor dem Besuch im PhotonLab enthielt folgende Punkte:

- Durchführung eines kurzen Experiments zum Doppelspaltversuch (optional)
- Vorführung des Videos „Dr. Quantum“<sup>1</sup>
- Besprechen von Organisatorischem (Ablauf des Besuchs)
- Schülerinnen und Schüler entscheiden sich in kleinen Gruppen mit Hilfe der Übersichtsfolie für einen Versuch
- Schülerinnen und Schüler arbeiten das Material zu ihrem Versuch gemeinsam in ihren Gruppen durch

Der genaue Überblick, den die Lehrkräfte erhielten, findet sich zudem im Anhang (s. A1.1).

---

<sup>1</sup> Das Video „Dr. Quantum“ beschreibt das Doppelspaltexperiment ausführlich mit Hilfe mehrerer Animationen (<https://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc>)



Die Vorbereitungsphase sollte so gewährleisten, dass die Gruppen sich im Vorfeld mit ihrem Experiment auseinandersetzen konnten. Jede Schülerin und jeder Schüler erhielt Material in Form eines Ausdrucks zu ihrem beziehungsweise seinem jeweiligen Versuch, die unter anderem eine beschriftete Aufbauskitze und Erklärungen zu allen unbekanntenen Komponenten des Aufbaus enthalten. Der Versuchsaufbau sollte somit nicht mehr vollständig neu für die Lernenden sein, wenn sie sich in der zweiten Phase im Labor befanden. Um die Wirksamkeit der Einbettung zu kontrollieren, wäre eine Kontrollgruppe, die den vorgestellten Kurs ohne Einbettung absolviert, nötig. Aus zeitlichen und Umfangsgründen war dies jedoch nicht möglich.

### **Besuch im PhotonLab**

Für den Kurs wurde der Ablauf im Labor weitestgehend beibehalten. Einige der Klassen wurden aufgrund ihrer Größe in zwei Gruppen aufgeteilt. Genauer hierzu findet sich in Kapitel 2.2.7.

Nachdem die Schülerinnen und Schüler in der Forschungseinrichtung eingetroffen waren, erhielten sie einen Einführungsvortrag durch die Leitung des Schülerlabors. Ein Überblick über den Einführungsvortrag findet sich im folgenden Kapitel 2.2.3. Im Anschluss folgte eine kurze Laborführung, in der die Lernenden Einblick in zwei Labore des MPQs erhielten.

Bevor die Experimentierphase begann, bekamen die Lernenden eine kurze Einführung zum Thema Lasersicherheit. Danach verteilten sich die im Unterricht gebildeten Gruppen auf ihre jeweiligen Experimente und fingen mit der Versuchsdurchführung an. Allen Gruppen stand eine Stunde reine Experimentierzeit zur Verfügung. In dieser Zeit sollten die Lernenden das Experiment durchführen, auswerten und ihre Ergebnisse so festhalten, dass sie in der dritten Phase des Kurses eine Präsentation halten konnten. Dabei arbeiteten die Lernenden ausschließlich mit den im Zuge dieser Arbeit entworfenen Versuchsanleitungen. Diese Anleitungen fanden sie auf den Ipad's im Schülerlabor. Bei Fragen konnten sich die Schülerinnen und Schüler an die Betreuer des PhotonLabs wenden. Falls eine Gruppe bereits vor Ablauf dieser Zeit mit ihrem Experiment fertig war, durften sich die Lernenden mit den anderen Experimente aus dem Schülerlabor beschäftigen.

### **Nachbereitungsphase**

In der ersten Physikstunde nach dem Besuch im PhotonLab sollten die Schülerinnen und Schüler in ihren Gruppen eine fünf- bis zehn-minütige Präsentation über ihren Versuch halten. Die Lernenden wurden vor Beginn des Kurses durch ihre Lehrkraft darüber informiert, dass sie eine Präsentation halten sollten. Die Präsentation sollte eine Beschreibung des Versuchsaufbaus, der Durchführung und ihrer Ergebnisse enthalten.

Darüber hinaus erhielten die Lernenden keine weiteren Anweisungen. Die Versuche sind inhaltlich und vom Anspruch her sehr unterschiedlich (s. Kapitel 2.2.5). Im Zuge dessen wurde den Lernenden bei der Gestaltung ihrer Referate viel Freiraum gelassen. Die Benotung der Präsentationen blieb den Lehrkräften freigestellt.

### 2.2.3 Einführungsvortrag im PhotonLab

Zu Beginn des Besuches im PhotonLab erhielten die Lernenden einen Einführungsvortrag. Dieser Vortrag umfasste die folgenden Themen: die historische Entstehung und verschiedenen Anwendungsgebiete von Lasern, den Welle-Teilchen-Dualismus mit Schwerpunkt auf dem Wellenbild von Licht und eine kurze Beschreibung einiger Forschungsgebiete des MPQs. Der Vortrag ist bereits vor dem entworfenen Kurs Bestandteil eines Besuches im PhotonLab gewesen. Er beschäftigt sich mit für die Experimente relevanten Inhalten wie der Interferenz von Wellen und dem Welle-Teilchen-Dualismus. Im Zuge dessen liefert das folgende Kapitel einen Überblick über die verschiedenen Themen des Vortrags. Die Folien des Vortrags sind auf Englisch verfasst. Jedoch wurde der Vortrag zum besseren Verständnis der Lernenden auf Deutsch gehalten. Alle Folien finden sich im Anhang. Alle Graphiken des folgenden Kapitels zeigen Ausschnitte aus diesen Folien.

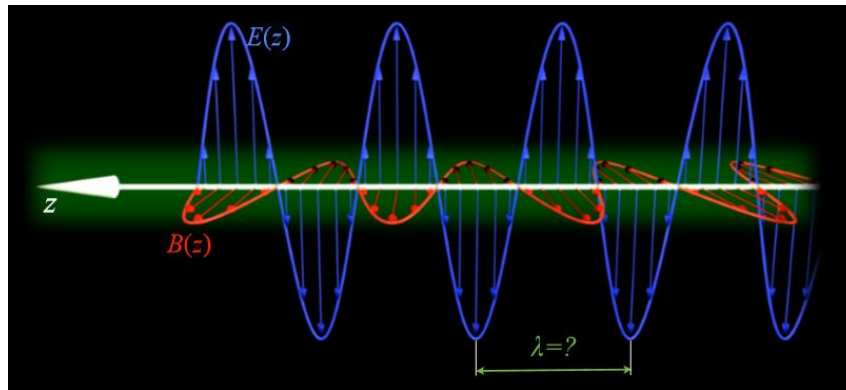
Der Vortrag beginnt mit der Beschreibung des ersten Lasers von Theodor Maiman. Die Schülerinnen und Schüler lernen hierbei die zentralen Bestandteile eines Lasers kennen.

Als nächstes wird mit Hilfe einer Animation zum Doppelspaltexperiment der Welle-Teilchen-Dualismus diskutiert. Die Animation zeigt ein klassisches Doppelspaltexperiment. Da die Lernenden im Laufe der Vorbereitungsphase bereits das Video „Dr. Quantum“ gesehen haben, kennen sie das Ergebnis dieses Versuches bereits.

Das Interferenzmuster wird mit Hilfe des Wellencharakters von Licht erklärt. Hierbei wird auf die Interferenz kreisförmiger Wellen eingegangen. Dieser Teil des Einführungsvortrags enthält einige Themen der ersten und dritten Unterrichtseinheit des Unterrichtskonzepts von Schorn et al. (2008).

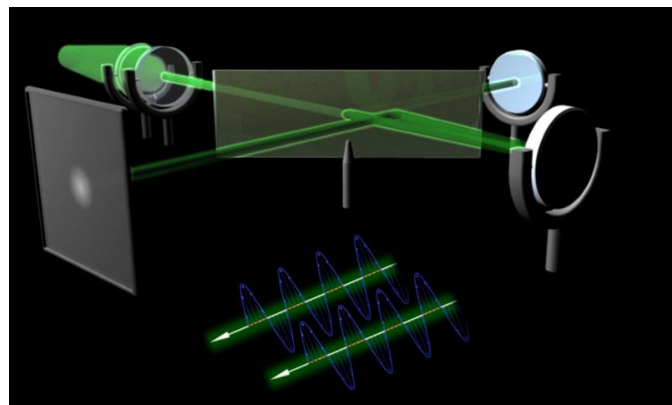
Im nächsten Schritt der Animation wird der Doppelspalt durch einen Photonendetektor ersetzt. Diese zeigt den Teilchencharakter von Licht. Eine erneute Durchführung mit Einzelphotonen führt zu dem Ergebnis, dass Licht sowohl Welle- als auch Teilchencharakter aufweist.

Der nächste Abschnitt des Vortrages konzentriert sich hauptsächlich auf das Wellenbild von Licht. Es folgen einige Folien, die Licht als elektromagnetische Welle beschreiben definiert (s. Abbildung 29).



**Abbildung 29: Licht als elektromagnetische Welle mit Wellenlänge  $\lambda$ , elektrischen Feld  $E(z)$  und magnetischen Feld  $B(z)$ .**

Im Anschluss wird eine Animation zum Michelson-Interferometer gezeigt. Die Animation beschreibt, wie die Wellenlänge von Laserlicht mit Hilfe des Interferometers bestimmt werden kann (s. Abbildung 30). Dabei werden Aufbau und Funktionsweise dieses Interferometers erläutert.



**Abbildung 30: Animation zum Michelson-Interferometer**

Es wird kurz auf die Entstehung elektromagnetischer Wellen eingegangen. Im nächsten Abschnitt wird die Funktionsweise eines Lasers anhand mehrerer Animationen veranschaulicht.

Der restliche Vortrag beschäftigt sich mit aktuellen Forschungen am Max Planck Institut für Quantenoptik. Abschließend wird die Website „Photonworld“<sup>2</sup> vorgestellt.

---

<sup>2</sup> Photonworld (<https://www.photonworld.de/>) ist eine Website der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.. Die Inhalte reichen von Erklärungen zu Grundlagen über Licht und Laser zu Informationen über aktuelle Wettbewerbe, Veranstaltungen und Schülerlabore.

## 2.2.4 Die Versuchsanleitungen

Im folgenden Kapitel werden die didaktischen Überlegungen zusammengefasst, die bei der Planung und Ausarbeitung der Versuchsmaterialien zentral waren. Zunächst werden die didaktischen Hintergründe beschrieben, die alle Versuche sowie der Einführungsvortrag gemeinsam haben. Danach wird auf die einzelnen Versuche und ihre jeweiligen Besonderheiten eingegangen. Die gesamten Anleitungen sowie die Folien des Einführungsvortrages können der dieser Arbeit beigelegten CD entnommen werden.

### Anmerkungen zu allen Versuchen

Da die Lernenden, die an dem Quantenphysikkurs teilnehmen, alle dieselbe Jahrgangsstufe besuchen und ungefähr zur selben Zeit den Kurs absolvierten, bringen alle weitestgehend ein ähnliches Vorwissen zur Quantenphysik mit. Dies zeigte auch die Auswertung des Wissenstest. Dieser enthielt die Frage, ob und wenn ja woher die Lernenden bereits Vorwissen zur Quantenphysik hatten. Die Lernenden antworteten zum Großteil bereits etwas Vorwissen aus der Schule zu haben.

Jede Gruppe führt ein anderes Experiment während des Laborbesuches durch. Dabei gibt es allgemeine Lernziele, die alle Versuche gemeinsam haben. Diese werden im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

### *Lernziele*

Um die Anleitungen zu strukturieren und den Ablauf des Kurses zu planen, wurden folgende Lernziele für alle Versuche formuliert. Es werden im folgenden Abschnitt nur Lernziele genannt, die mit Hilfe des Wissenstests überprüft werden können.

### Allgemeine Lernziele zum Welle-Teilchen-Dualismus

Durch den Einführungsvortrag, in dem der Welle-Teilchen-Dualismus anschaulich thematisiert wird und durch die Vorbereitungsphase im Unterricht sollen folgende Lernziele erreicht werden:

- Die Lernenden unterscheiden zwischen Wellencharakter und Teilchencharakter von Licht.
- Die Lernenden beschreiben den Wellencharakter von Licht anhand der Ergebnisse des Doppelspaltexperiments.

- Die Lernenden erklären die Entstehung des Interferenzmusters im Doppelspaltexperiment.

#### Lernziele zu den einzelnen Versuchen

- Die Lernenden skizzieren den Versuchsaufbau und nennen wesentliche Bestandteile des Experiments mit fachlich korrekter Bezeichnung.
- Die Lernenden zeichnen einen möglichen Strahlengang in den Versuchsaufbau ein.

Durch Binnendifferenzierung ergaben sich darüber hinaus weitere für die jeweiligen Experimente spezifische Lernziele. Diese Lernziele finden sich in den Abschnitten zu den spezifischen Versuchen in Kapitel 2.2.5.

#### **Die Struktur der Anleitungen**

Bis auf den Versuch zum „Knaller-Experiment“ waren alle Experimente bereits Teil der Ausstattung des PhotonLabs. Es waren Anleitungen zu diesen Experimenten vorhanden. Da diese bisherigen Anleitungen von unterschiedlichen Personen gestaltet wurden, mussten einige Änderungen vorgenommen werden, um die Texte und das Layout anzugleichen.

Zum einen sollten die Anleitungen denselben Grundaufbau haben. Hierzu wurde zu jedem Versuch, falls noch nicht vorhanden, eine Motivation erstellt und der Aufbau umstrukturiert. Der genaue Aufbau wird in diesem Kapitel noch beschrieben.

Zum anderen wurden die Anleitungen hinsichtlich Tippfehler, Übersichtlichkeit und fachlicher Ungenauigkeiten überarbeitet. Zum Teil wurden neue Abbildungen für die Versuchsaufbauten mit farbig eingezeichnetem Strahlengang entworfen, um den Aufbau übersichtlicher zu gestalten.

Für jedes Experiment wurde ein Text zu den fachlichen Grundlagen erstellt. Im Zuge dessen wurden viele neue Abbildungen und zum Teil Übersichten erstellt, die es den Lernenden ermöglichen sollten, einen Überblick über die Themen des Experiments zu bekommen. Für den bisherigen Besuch einer Klasse im Schülerlabor war dies noch nicht notwendig, da die Lernenden sich nicht derart ausführlich mit den einzelnen Experimenten beschäftigen sollten.

Das Knaller-Experiment wurde für den Quantenphysikkurs hinzugefügt. Die Anleitung zu diesem Versuch wurde komplett neu verfasst.

Alle Anleitungen beginnen mit einer Einleitung, die die Lernenden für den Versuch motivieren soll. Meistens ist es das Ziel, das Sachinteresse für die Thematik zu wecken, indem Anwendungen der Versuche beschrieben werden. Eine ausführliche Beschreibung der Überlegungen zur Motivation befindet sich im nächsten Kapitel.

Als nächstes werden fachliche Grundlagen erläutert, die zur Durchführung und Auswertung der Versuche benötigt werden. In den meisten Fällen handelt es sich um die Beschreibung der Funktionsweise eines Interferometers oder der Polarisation von Licht. Oft wird im Zuge dessen erneut die Interferenz von Lichtwellen thematisiert.

Daraufhin wird der Versuchsaufbau anhand einer beschrifteten Skizze oder Abbildung gezeigt. Dieselbe Seite enthält zudem eine Materialiste und eine Beschreibung der Komponenten, falls den Lernenden die Funktionsweise noch nicht bekannt ist.

Nach dem Versuchsaufbau wird die Versuchsdurchführung beschrieben. Meistens bestehen die Versuche aus mehreren Teilversuchen. Schlussendlich finden sich bei einigen der komplexeren Versuche wie dem Knaller Experiment noch Hinweise und Hilfestellungen zur Auswertung.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten zur Vorbereitung in der Schule nur einen Teil der Anleitungen. Dieser Teil enthält die Motivation, die fachlichen Grundlagen sowie den Versuchsaufbau.

Die Anleitungen zur Versuchsdurchführung und Auswertung erhalten die Lernenden erst bei ihrem Versuch im PhotonLab. Diese können sie auf den Tablets, die im Labor jeder Gruppe zur Verfügung stehen, einsehen.

### **Fachdidaktische Überlegungen zu den Anleitungen**

In den folgenden Abschnitten werden fachdidaktische Überlegungen, die bei dem Entwurf der Anleitungen angestellt wurden, zusammengefasst. Hierbei wird zunächst auf das Präkonzept der Schülerinnen und Schüler zu Quantenphysik eingegangen.

### *Präkonzept*

Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben existieren viele potentielle Fehlvorstellungen zum Thema Quantenphysik. Der entworfene Quantenphysikkurs soll Fehlvorstellungen entgegenwirken und bereits vorhandene falsche Vorstellungen korrigieren.

Beispielsweise ist es wichtig, dass die Lernenden durch Aufzeigen von Phänomenen der Quantenphysik bemerken, dass der Teilchencharakter von Photonen nicht alle Beobachtungen und Ergebnisse von Versuchen erklärt. Hierzu wird unter anderem im Einführungsvortrag anhand des Doppelspaltexperiments der Unterschied zwischen Welle- und Teilchencharakter ausführlich erläutert. Dabei wird genau beschrieben, welche Beobachtungen auf den Wellencharakter und welche auf den Teilchencharakter schließen lassen. In vielen der Experimente des Kurses wie beispielsweise dem „Knaller-Experiment“ ist die Unterscheidung zwischen Welle- und Teilchencharakter von zentraler Bedeutung.

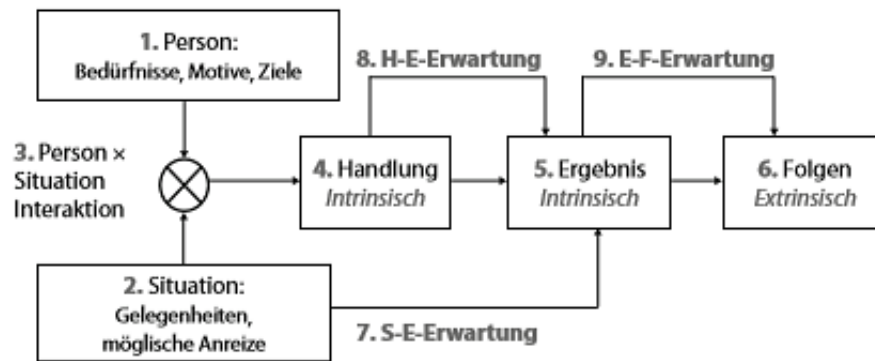
### *Lehrplanzuordnung*

Der Quantenphysikkurs ist für die 10. Jahrgangsstufe des achtjährigen bayrischen Gymnasiums entworfen worden. Wie in Kapitel 2.1.1 im Abschnitt „Lehrplanaspekte“ aufgeführt wurde, beinhaltet der Lehrplan in dieser Klasse unter anderem den Bereich „Ph. 10.3 Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik“. Bei der Auswahl der Versuche und der Inhalte des Kurses wurden die Lehrplanaspekte berücksichtigt.

### *Motivation*

Da die Versuche und die Thematik des Kurses für Lernende der 10. Klasse durchaus komplex sind, war es entscheidend alle Experimente gut zu motivieren. Nach Heckhausen (2010, S.3) gibt es personenbezogene und situationsbezogenen Faktoren, die unsere Motivation beeinflussen. Teil dieser Einflüsse sind auch die Ergebnisse und Folgen, die erwartet werden (s. Abbildung 31).





**Abbildung 31: Überblicksmodell zu Determinanten motivierenden Handelns mit ergebnis- und folgebezogenen Erwartungen (Heckhausen, 2010, S.5)**

Die personenbezogenen Faktoren bringen die Lernenden selbst mit wie beispielsweise eventuell vorhandenes Interesse für die Quantenphysik (Heckhausen, 2010, S. 52f).

In der Schule hatten die Lernenden vor dem Kurs in der Regel keine Physikstunden, die sich konkret mit den Themen des Kurses auseinandersetzten, erhalten. Die Experimente und deren Vorbereitung können somit als Einstieg in die Quantenphysik betrachtet werden. Gemäß Kircher et al. (2015, S.231) kann ein Versuch zu Beginn eines neuen Themengebiets das Interesse für die Inhalte wecken.

Eine Person kann zudem durch Anreize, die aus der Handlung oder aus dem Ergebnis selbst entstehen, motiviert werden. Diese Anreize werden intrinsisch genannt. Motivation, die sich aus den Folgen ergibt wie beispielsweise Fremdbewertung oder materielle Anreize, bezeichnet man als extrinsisch. (Heckhausen, 2010, S.5f)

Im Quantenphysikkurs wird sowohl mit intrinsischer als auch mit extrinsischer Motivation gearbeitet.

### Intrinsische Motivation

Nach Deci und Ryan kann intrinsische Motivation durch Selbstbestimmung und Kompetenzerleben entstehen (Heckhausen, 2010, S. 369).

Beim Experimentieren im Schülerlabor haben die Lernenden die Möglichkeit, die Versuche eigenständig durchzuführen. Durch die Anleitungen ist ihnen ein Leitfaden vorgegeben, an dem sich die Schülerinnen und Schüler orientieren können. Beispielsweise müssen sie bei Experimenten wie dem Michelson-Interferometer und dem Knaller Experiment den Aufbau selbst justieren. Hier haben sie die Möglichkeit durch eigene Erfahrungen und Überlegungen, den Aufbau gezielt so zu verändern, dass sie das gewünschte Ergebnis erhalten. Bei erfolgreichem Justieren haben sie zudem ein positives

Kompetenzerleben, was die intrinsische Motivation wie oben beschrieben ebenfalls fördern kann. In der Versuchsanleitung zu Quantenkryptographie ist die Versuchsdurchführung sehr offen formuliert. So können die Lernenden frei entscheiden, wie sie den Versuch genau durchführen und an ihr Ziel gelangen. Falls die Versuche durch diese Maßnahmen, die Selbstbestimmung möglichst groß zu halten, zu komplex werden, finden die Lernenden Hilfestellungen auf den Tablets in Form von Hinweisen oder Videos.

#### Extrinsische Motivation

Da die Lernenden in der dritten Phase des Quantenphysikkurses eine kurze Präsentation über ihr Experiment halten sollen, die von den Lehrkräften in den meisten Fällen benotet wurde, ist die Durchführung der Versuche zudem extrinsisch motiviert.

Neben den oben genannten Aspekten wurde für jeden Versuch ein in Hinblick auf die Fachdidaktik motivierender Einstieg gewählt. In den Kapiteln zu den einzelnen Versuchen werden diese näher beschrieben.

### **2.2.5 Die Versuche**

Für den entworfenen Kurs wurden vier Versuche aus den bisherigen Experimenten des PhotonLabs ausgewählt. Ein weiterer Versuch, das „Knaller-Experiment“ wurde neu beschaffen. Es wurden Experimente ausgewählt, die sich mit bestimmten Themen der Quantenphysik wie dem Welle-Teilchen-Dualismus beschäftigen. Zudem sollte die Durchführung der Versuche in etwa eine Stunde in Anspruch nehmen. Nur vier der Versuche im Schülerlabor erfüllten diese Kriterien. Das „Knaller-Experiment“ wurde neu beschaffen, da die Schülergruppen an den einzelnen Stationen bei nur vier Experimenten zu groß geworden wären.

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Versuche beschrieben, die Teil des entworfenen Quantenphysikkurses sind. Zunächst wird ein allgemeiner Überblick über die Inhalte des Experiments gegeben und danach einzelne didaktische Überlegungen, die für den Versuch relevant sind, kurz erläutert.

#### **Das Michelson-Interferometer**

Der Versuch zum Michelson-Interferometer setzt sich aus drei Teilversuchen zusammen. Die Lernenden beginnen den Versuch mit einem klassischen Michelson-Interferometer, wie es in Kapitel 2.1.2 im Abschnitt zur Interferenz von Wellen beschrieben wird.

Im ersten Teilversuch sollen die Schülerinnen und Schüler das zuvor dejustierte Interferometer justieren. Ziel ist es, ein klar erkennbares Interferenzmuster auf dem Schirm zu erhalten. Um die Lernenden beim Justieren zu unterstützen, enthält die Anleitung einige Hilfestellungen.

Im zweiten Teilversuch soll die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts bestimmt werden. Hierzu verändern die Lernenden die Position eines Spiegels. Sie notieren sich die Distanz, um die der Spiegel verschoben wurde, und die Maxima, die währenddessen das Interferenzmuster durchlaufen haben. Im Anschluss werden diese Werte in eine Formel eingesetzt, um die Wellenlänge zu bestimmen. Die Lernenden können ihr Ergebnis in der Anleitung prüfen.

Der dritte Teilversuch soll den Lernenden die Empfindlichkeit des Messgeräts vor Augen führen. Motiviert wird der Versuch mit dem Thema Gravitationswellen. In einem

Video (s. A4) auf den Tablets können die Lernenden zudem mehr über Gravitationswellen erfahren. Um einen Bezug zu dieser Motivation wieder herzustellen, greift der letzte Teilversuch diese Thematik erneut auf (s. Abbildung 32). Die Lernenden können mit dem Aufbau im PhotonLab keine Gravitationswellen messen, da der Versuchsaufbau offensichtlich viel zu ungenau ist. Durch leichte Erschütterung des Versuchstisches können sie jedoch die Wellen simulieren. In diesem Teilversuch soll rein qualitativ die Veränderung des Interferenzmusters durch die Erschütterung beobachtet werden.

## Gravitationswellen erkennen

Um Gravitationswellen zu bestimmen braucht es Interferometerarme, die mehrere Kilometer lang sind. Das Interferometer muss so groß sein, um derart kleine Signale messen zu können.



Unser Interferometer im Versuch ist leider zu ungenau. Trotzdem können wir die Gravitationswellen simulieren:

Durch leichte Erschütterungen des Versuchsaufbaus (zum Beispiel durch Klopfen auf den Versuchstisch) können wir die Wellen simulieren (natürlich ist dieses Signal wesentlich stärker)

Was könnt ihr beobachten?

### Abbildung 32: Ausschnitt aus den Folien der Anleitung zum Michelson-Interferometer

Folgende zentrale Themen des Kurses werden in diesem Experiment thematisiert

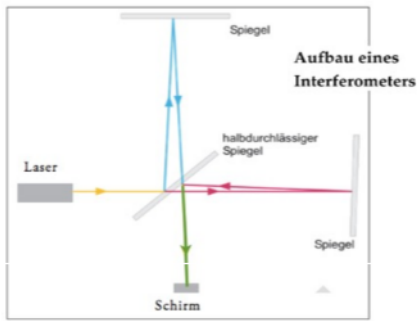
- Die Interferenz von Wellen und die Entstehung eines Interferenzmusters

Die Lernenden haben bereits zuvor im Einführungsvortrag eine kurze Animation über die Funktionsweise des Michelson-Interferometers gezeigt bekommen. Im Versuch können sie nach korrekter Justierung ein Interferenzmuster erkennen und bei Veränderung der Interferometerarmlänge in Teilversuch 2 und 3 die Änderungen in diesem Muster beobachten.

- Der Aufbau des Michelson-Interferometers und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten wie beispielsweise des Strahlteilers

Eine beschriftete Versuchsskizze (s. Abbildung 33) finden die Lernenden in den Anleitungen.

### Der Versuchsaufbau



Für diesen Versuch benötigt man:

- 2 Spiegel
- 1 halbdurchlässigen Spiegel
- 1 Beobachtungsschirm
- 1 Laser

Der halbdurchlässige Spiegel wird oft auch **Strahlteiler** genannt. Er teilt den Laserstrahl in zwei Strahlen auf, indem er 50% des Laserlichts **reflektiert** und die anderen 50% **hindurchlässt**. (Eine genauere Beschreibung findet unter dem Link)

**Abbildung 33: Versuchsaufbau – Michelson-Interferometer**

Um das Interferometer justieren zu können, ist die Kenntnis der einzelnen Komponenten und deren Funktionsweise erforderlich. Die Funktionsweise des Strahlteilers wird ausführlich beschrieben.

- Der Wellencharakter von Licht und im Zuge dessen die Wellenlänge von sichtbarem Licht

Die Anleitung zum zweiten Teilversuch beschreibt den Begriff Wellenlänge des Lichts (s. Abbildung 34). Im Versuch wird die Wellenlänge von grünem Laserlicht bestimmt.

## Wellenlänge bestimmen

In folgendem Versuch wird die Wellenlänge des Lasers bestimmt. Ist das Licht im sichtbaren Bereich so befindet sich seine Wellenlänge im Bereich zwischen 400 nm und 700 nm (nm= 10<sup>-9</sup>m). Die Wellenlänge gibt uns die Länge an, ab der sich die Lichtwelle des Lasers wiederholt (also die Länge der Periode).

Wie unser Interferenzmuster aussieht hängt unter anderem von der Wellenlänge des Lichts ab. Im Allgemeinen gilt je näher die Interferenzmaxima (die hellen Streifen) des Musters bei gleichem Aufbau liegen, desto kleiner ist die Wellenlänge.

Babu, B., Lommee, B., & Pizzolo, R. (2018) Quirky Quanta, Springer Berlin Heidelberg S.8

**Abbildung 34: Wellenlänge bestimmen – Michelson-Interferometer**

Neben den Lernzielen, die in Kapitel 2.2.4 formuliert sind, wird folgendes Lernziel mit Hilfe des Wissenstest geprüft:

- Die Lernenden beschreiben die Entstehung des Interferenzmusters im Michelson-Interferometer.

Dreht man im Versuchsaufbau des Michelson-Interferometers an der Mikrometerschraube, so kann eine Änderung im Interferenzmuster beobachtet werden. Das Drehen an der Mikrometerschraube verändert die Länge eines Interferometerarms. Je nach Änderung überlagern sich die Teilwellen anders. Die Maxima und Minima des Interferenzmusters auf dem Schirm verschieben sich.

### Die optische Pinzette

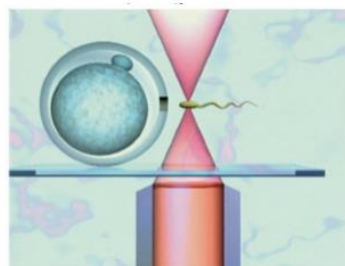
Für diesen Versuch wurden zwei Experimente des PhotonLabs kombiniert, da die Versuchsdauer sonst sehr viel geringer als die der anderen Versuche gewesen wäre. Zudem konnten die Lernenden beim zweiten Experiment mit Hilfe von Interferenz die Ergebnisse des ersten überprüfen. Das gesamte Experiment enthält zwei Teilversuche.

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnt, können personenbezogene Faktoren wie beispielsweise das Interesse an einem bestimmten Thema die Motivation fördern. Die Interessenstudie des IPN fand heraus, dass der Kontext, in den das Thema eingebettet ist, Einfluss auf das Sachinteresse ausüben kann. Es zeigte sich, dass unter anderem Kontexte, die Bezug zum menschlichen Körper und damit zur Medizin haben, förderlich für das Interesse sind. (Kircher et al., 2009, S.588ff)

Die optische Pinzette findet besonders in der Biologie Anwendung. Eine Anwendung wurde genutzt, um das Interesse und somit die Motivation der Schülerinnen und Schüler für diesen Versuch zu steigern (s. Abbildung 35).

## Künstliche Befruchtung

Die Funktionsweise der optische Pinzette erlaubt es, sehr kleine Körper (in diesem Fall ein Spermium) mittels eines Laserstrahls einzufangen und zu verschieben. Bei der künstlichen Befruchtung wird der Eizelle zunächst ein kleiner Schnitt mit dem Laser zugefügt. Das Spermium wird mit dem Laserstrahl eingefangen und zu dem Schnitt in der Zellenwand bewegt.



<http://www.phy.vt.uni-heidelberg.de/~stiele/lehrer/Greulich143.09.pdf>

Abbildung 35: Motivation - optische Pinzette

Im ersten Teilversuch beschäftigen sich die Schülerinnen und Schüler mit der optischen Pinzette selbst. Die Lernenden können mit Hilfe eines Lasers, der auf die Probe im Mikroskop fokussiert ist, Teilchen mit einem Durchmesser im Mikrometerbereich festhalten und verschieben.

Der Versuch zur optischen Pinzette behandelt folgende Inhalte:

- Die Lernenden beschreiben die Funktionsweise der optischen Pinzette

In der Anleitung wird die Funktionsweise ausführlich mit mehreren Hilfsskizzen erläutert, die den Impulsübertrag veranschaulichen (s. Abbildung 36).

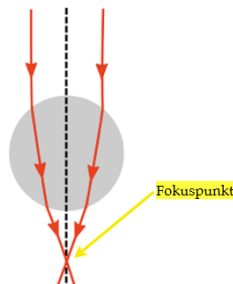
Wird ein Lichtstrahl gebrochen, bewegt er sich danach in einer anderen Richtung. Diese Richtungsänderung der Photonen bedeutet auch eine Impulsänderung.

Diese Impulsänderung überträgt einen Gegenimpuls auf das Medium, das den Lichtstrahl gebrochen hat.

Dieser Impuls ist nur minimal, aber vorhanden und er ist stark genug Teilchen mit winziger Masse zu bewegen.

Fokussiert man den Laser in einem Punkt, ergibt die Summe aller durch verschiedene Lichtstrahlen übertragenen Impulse stets eine Kraft hin zu diesem Punkt. Das kann man sich folgendermaßen vorstellen:

Der Strahlengang durch die Kugel, wenn sie sich oberhalb des Fokuspunktes befindet.



**Abbildung 36: Ausschnitte aus den Anleitungen der optischen Pinzette: Impulsübertrag und Vektoraddition**

- Der Brechungsindex

Um die Funktionsweise der optischen Pinzette zu verstehen, wird der Begriff Brechungsindex erläutert (s. Abbildung 37). Das Phänomen der Brechung wird in der 7. Klasse Gymnasium rein qualitativ behandelt, daher ist der Brechungsindex den meisten Lernenden noch nicht bekannt. (ISB, 2004c)



#### *Was ist der Brechungsindex?*

Der Brechungsindex ist eine Materialkonstante.

Jeder Stoff hat seinen eigenen Brechungsindex, aus dem man berechnen kann wie schnell sich Licht einer bestimmten Wellenlänge in diesem Material bewegt und wie stark der Lichtstrahl beim Übergang zwischen zwei Materialien abgelenkt wird.

Mehr zum Thema Brechung und Brechungsindex findet [hier](#) bzw. auf der nächsten Seite.

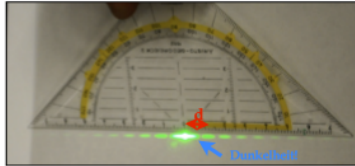
**Abbildung 37: Brechungsindex – optische Pinzette**

Das folgende Lernziel soll im Wissenstest überprüft werden.

- Die Lernenden beschreiben qualitativ, wie ein Teilchen durch einen Laser fixiert werden kann.

Im zweiten Teilversuch wird zunächst der Durchmesser eines Haares mit dem Mikroskop abgeschätzt. Im Anschluss bestimmen die Lernenden die Durchmesser desselben Haares mit Hilfe von Interferenz (s. Abbildung 38). Hierzu wird der Versuch zur Bestimmung der Haardicke genutzt, der sich auch als eigenständiger Versuch im Photon-Lab befindet. Das Haar wird vor einen Laser gespannt und die Lernenden können aus dem entstandenen Interferenzmuster den Haardurchmesser bestimmen. Die Lernenden messen den Abstand zwischen nulltem und ersten Maxima, den Abstand zwischen Haar und Schirm und setzen alle Werte in eine angegebene Formel ein. Die Herleitung der Formel kann in der Anleitung nachgelesen werden. Da die Interferenz am Doppelspalt wie in Kapitel 2.1.1 bereits erwähnt nur qualitativ in der 10. Jahrgangsstufe des achtjährigen Gymnasiums behandelt wird, wurde von einer Herleitung durch die Lernenden selbst abgesehen. Danach werden die beiden Ergebnisse verglichen und die Lernenden können ihr Ergebnis wie beim Michelson-Interferometer in den Anleitungen überprüfen.





Misst nun den Abstand  $d$  in cm zwischen der Mitte des hellsten Streifens/Punktes (Maximum 0. Ordnung) zur Mitte des zweithellsten Streifens rechts bzw. links daneben (Maximum 1. Ordnung). Bestimmt zudem den Abstand  $D$  zwischen dem Haar und dem Schirm.

Für ein Haar der Dicke  $h$ , das mit einem Laser der Wellenlänge  $\lambda$  (rot:  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , grün:  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) beleuchtet wird, ergibt sich folgende Formel :

$$h = \frac{3}{2} \lambda \frac{D}{d}$$

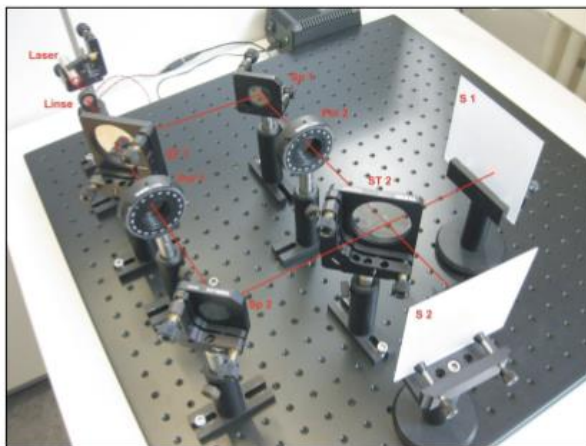
Berechne nun mit deinen Messergebnissen und dieser Formel deine Haardicke in [Mikrometern](#).

Für Interessierte: [Hier](#) findet ihr Informationen über die Herleitung der Formel.

**Abbildung 38: Bestimmung der Haardicke**

## Der Quantenradierer

Der Versuch zum Quantenradierer beschäftigt sich mit dem Komplementaritätsprinzip. Der Aufbau ist in der folgenden Abbildung (39) dargestellt.



Dieser Versuch sollte bereits wie auf dem Bild angeordnet sein.

Der Aufbau enthält:

- einen Laser
- 2 Spiegel (Sp)
- 2 [Strahlteiler](#) (ST)
- 2 Polarisationsfilter (Pol)
- 2 Schirme (S)

Für den zweiten Teilversuch benötigen wir noch einen dritten Polarisationsfilter.

(Um Informationen über die Strahlteiler zu erhalten drückt auf den Link oben)

**Abbildung 39: Versuchsaufbau – Quantenradierer**

Bei dem Grundaufbau handelt es sich um ein Mach-Zehnder-Interferometer bei welchem zwei Polarisationsfilter, deren Polarisation senkrecht zueinander steht ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ), in die Interferometerarme gestellt werden können. Nun besteht die Möglichkeit, eine Welcher-Weg Information zu erhalten, indem man die Polarisation der Photonen bestimmt. Die Möglichkeit die Weginformation zu erhalten führt zur Auslöschung der Interferenz (s. Kapitel 2.1.3).

Um einen Quantenradierer zu erhalten, platzieren die Lernenden einen dritten Polarisationsfilter zwischen den zweiten Strahlteiler und einen der Schirme. Dieser Polarisator steht im  $45^\circ$  Winkel. Die Lernenden sollen in diesem Versuch beobachten, wie er Erhalt der Welcher-Weg-Informationen zum Verlust der Interferenz führt.

Die Versuchsdurchführung weist keine großen Schwierigkeiten auf, da die Lernenden den Aufbau nicht justieren müssen wie beispielsweise das Michelson-Interferometer. Da der Aufbau für Ungeübte nur sehr schwer zu justieren ist und es viel Geduld und Zeit erfordert, wurde dieser Schritt weggelassen. Ist das Mach-Zehnder-Interferometer gut justiert, sind die Ergebnisse bei korrekter Durchführung klar und deutlich zu beobachten. Die Komplexität des Versuchs steckt in der Thematik.

Die meisten Versuche des Kurses wie das Michelson-Interferometer oder die optische Pinzette wurden über eine Anwendung des Experiments in der Technik motiviert. Beim Quantenradierer schied diese Möglichkeit aufgrund mangelnder Anwendung in der Technik aus.

Nach Kircher et al. (2009, S. 181f) kann Motivation auch aufgrund eines kognitiven Konfliktes entstehen. Dieser wird beispielsweise bei den Lernenden hervorgerufen, falls das Beobachtete nicht mit dem bisherigen Wissen erklärt werden kann.

Nun liefert die Quantenphysik für die Lernenden viele Phänomene, die sich die Lernenden mit ihrer bisherigen Vorstellung der klassischen Physik nicht erklären können. Eines dieser Phänomene ist das Komplementaritätsprinzip. Dieses Prinzip besagt, dass Quantenobjekte kein Interferenzmuster ausbilden, sobald die Möglichkeit besteht, eine „Welcher-Weg-Information“ zu erhalten (Kapitel 2.1.3). Das Phänomen wird zu Beginn der Anleitung des Versuches anhand eines Doppelspaltexperiments mit Elektronen beschrieben und zur Motivation für den Versuch zum Quantenradierer genutzt (s. Abbildung 40).

In den Anleitungen wird der Begriff „Komplementaritätsprinzip“ selbst nicht verwendet. Das Phänomen, das dahinter steht, wird jedoch beschrieben (s. Abbildung 41)

Wir haben bereits gelernt, dass sich Licht manchmal wie eine Welle und manchmal wie ein Teilchen verhält. Somit hat Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften (das nennt man den Welle-Teilchen-Dualismus).

Sendet man einen Laserstrahl auf einen Doppelspalt kann man ein [Interferenzmuster](#) auf dem Schirm hinter dem Spalt beobachten. Die Photonen verhalten sich demnach wie eine Welle, sie zeigen also Welleneigenschaften. Auch wenn wir die Photonen einzeln durch den Spalt senden, erhalten wir dieses Interferenzmuster



Wir führen das gleiche Experiment nochmal durch nur diesmal beobachten wir welchen Weg die Photonen nehmen (geht das Photon durch den linken oder rechten Spalt?). Doch diesmal verschwindet unser Interferenzmuster. Auf dem Schirm erhält man zwei Linien wie man es bei Teilchen erwarten würde. Die Photonen verhalten sich wie Teilchen.

**Abbildung 40: Doppelspaltexperiment mit Elektronen - Quantenradierer**

Die Weginformation die wir erhalten zerstört somit unsere Interferenz. Das selbe Phänomen kann auch bei Photonen beobachtet werden. Damit wollen wir uns im ersten Teilversuch beschäftigen.

Natürlich können wir uns nicht im Experiment neben den Doppelspalt setzen und notieren welches Photon durch welchen Spalt geht. Wir müssen die Weginformation anders erhalten.



Stapp, D., Lammert, D., & Tittel, F. (2000) *Quantik: Quantik*, Springer Berlin Heidelberg, 6120

In unserem Versuch wollen wir mittels Polarisation unterscheiden, welches Photon welchen Weg genommen hat. Hierzu polarisieren wir das Licht in den verschiedenen Wegen in unterschiedlichen Orientierungen.

**Abbildung 41: Ausschnitt aus der Anleitung des Quantenradierers – Komplementaritätsprinzip und Erhalt der Weginformation**

Im Rahmen der Versuchsdurchführung beschäftigen sich die Lernenden zudem mit dem Aufbau und der Funktionsweise des Mach-Zehnder Interferometers und der Polarisation von Licht. Zu letzterem erhalten die Lernenden ähnliche Grundlagen, wie sie im Versuch zu Quantenkryptographie beschrieben werden.

Das folgende Lernziel war für diesen Versuch spezifisch:

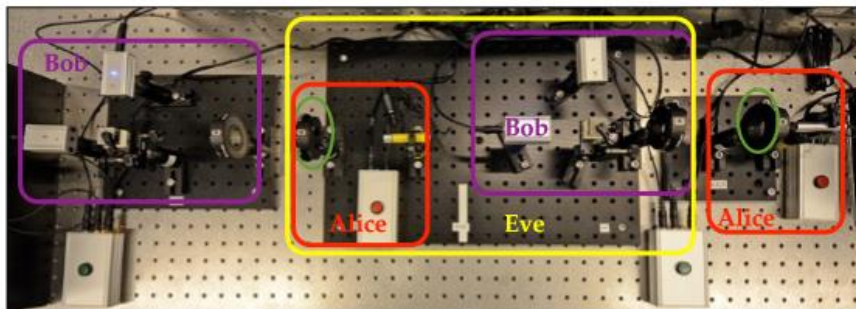
- Die Lernenden nutzen das Komplementaritätsprinzip, um das Verschwinden des Interferenzmusters während der Durchführung des Versuchs zu erläutern.

## Die Quantenkryptographie

Der Versuch zur Quantenkryptographie beschäftigt sich mit einem möglichen Verfahren, Nachrichten zu verschlüsseln. Im ersten Teilversuch sollen die Lernenden einen Schlüssel generieren. In einem zweiten Teilversuch soll ein Szenario durchgespielt werden, in dem ein Lauscher versucht die Nachricht abzuhören und entdeckt wird.

Der Versuchsaufbau setzt sich aus zwei Sender- und zwei Empfängereinheiten zusammen (s. Abbildung 42).

Der Versuchsaufbau setzt sich aus zwei identischen Hälften zusammen:



**Abbildung 42: Versuchsaufbau – Quantenkryptographie ( Alice: Sendereinheit, Bob: Empfängereinheit)**

Die Empfängereinheit enthält einen Strahlteiler, der das Licht je nach Polarisation reflektiert oder transmittiert. Sowohl Sender als auch Empfänger können mit Hilfe eines Polarisationsdrehers eine Basis auswählen, in der sie versenden beziehungsweise empfangen. Es kann zwischen zwei Basen gewählt werden (s. Abbildung 43).



**Abbildung 43: Basen, in denen Bits gesendet werden können - Quantenkryptographie**

Die Generierung eines Schlüssels wird in Kapitel 2.1.3 im Abschnitt zur Quantenkryptographie näher erläutert.

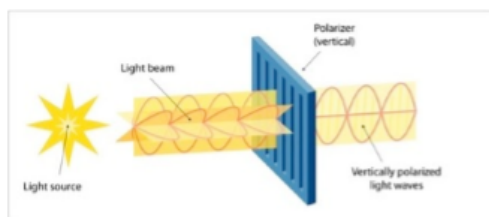
Um den Lauscher im zweiten Teilversuch zu entdecken, überträgt der Sender frei gewählte Bits in willkürlichen Basen an den Empfänger. Eine Schülerin oder ein Schüler bedient nun eine weitere Sender- und Empfängereinheit, die zwischen die beiden ande-

ren Einheiten geschaltet ist, und versucht die Nachricht abzuhören. Der Lauscher sendet dasselbe Bit, das er empfangen hat, in derselben Basis, in der er es empfangen hat. Tauschen sich Sender und Empfänger im Anschluss über die Bits und Basen aus, wird der Lauscher aufgrund von Unstimmigkeiten entdeckt.

Die Durchführung des Versuches ist an sich nicht anspruchsvoller als die des Quantenradierers. Die zugehörige Anleitung ist jedoch mit 17 Seiten die umfangreichste des Kurses. Es wurde darauf geachtet, die Anleitung so übersichtlich wie möglich zu gestalten. Jedoch beschäftigt sich der Versuch mit vielen Themen, die den meisten Lernenden zu Beginn des Kurses noch unbekannt sind wie beispielsweise Binärcodes, Binäraddition und Polarisation von Licht. Zudem enthält der Versuchsaufbau viele Komponenten, deren Funktion in der Anleitung erläutert werden musste. Dies alles sind Gründe für die vergleichsweise lange Anleitung und die daraus resultierende Komplexität des Experiments.

Inhaltlich setzt sich dieser Versuch hauptsächlich mit der Polarisation von Licht auseinander. Zu Beginn des Laborbesuchs wird unter anderem auch darauf eingegangen. Dabei erhalten die Schülerinnen und Schüler erhalten je drei Polarisationsfolien. Diese können aufeinandergelegt und gegeneinander verdreht werden, wodurch der Effekt erkennbar wird. Auch die Anleitungen enthalten eine kurze Zusammenfassung zum Thema Polarisation von Licht, in der die für den Versuch relevanten Informationen erläutert werden (s. Abbildung 44).

In unserem Versuch übertragen wir die Informationen (0 oder 1) über polarisiertes Laserlicht. Normalerweise emittieren Laser unpolarisiertes Licht. Das bedeutet, dass Licht jeder Orientierung vom Laser ausgesendet wird.



<http://chubbrevision.weebly.com/wavec.html>

In der Abbildung trifft unpolarisiertes Licht auf einen Polarisationsfilter. Das Licht hinter dem Polarisationsfilter ist nun linear polarisiert.

Unser Laser im Versuchsaufbau sendet (fast vollständig) linear polarisiertes Licht aus. Das Licht verlässt den Laser also nur in einer Orientierung und kann nun von sogenannten Polarisationsdrehern (s. Versuchsaufbau) um einen beliebigen Winkel gedreht werden.

In unserem Versuch verwenden wir  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  (horizontal),  $45^\circ$  und  $90^\circ$  (vertikal) polarisiertes Licht.

#### **Abbildung 44: Polarisation von Licht - Quantenkryptographie**

Im Wissenstest soll zu diesem Versuch folgendes Lernziel geprüft werden.

- Die Lernenden nutzen die Funktionsweise des Polarisationsdrehers und des polarisierenden Strahlteilers, um einen in der Versuchsdurchführung behandelten Fall zu erklären.

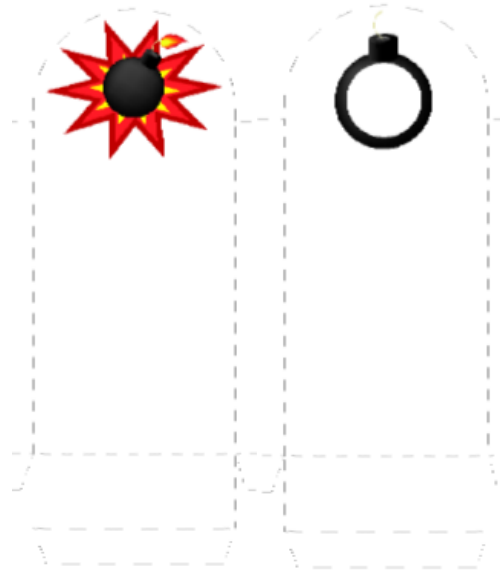
### **Das Knaller-Experiment**

Das Knaller-Experiment soll das Prinzip der wechselwirkungsfreien Quantenmessung veranschaulichen.

Der Aufbau besteht aus einem klassischen Michelson-Interferometer. Im Laufe des Versuches wird das Interferometer so justiert, dass das kreisförmige Interferenzmuster mittig ein Minimum aufweist. An dieser Stelle wird der Photonendetektor platziert. An den Photonendetektor wird ein Voltmeter angeschlossen.

Ziel des Versuches ist es, dass die Schülerinnen und Schüler die theoretischen Überlegungen des Gedankenexperiments aus Kapitel 2.1.2 beobachten können. Da dem PhotonLab keine Einzelphotonenquelle zur Verfügung steht, wird das Experiment mit einem gewöhnlichen Laser durchgeführt. Darauf und auf die daraus resultierenden Unterschiede wird in der Anleitung hingewiesen.

Die Lernenden justieren nun zunächst das Interferometer und notieren im Anschluss jeweils drei Messwerte für die scharfe Bombe und den Blindgänge (Attrappen s. Abbildung 45). Wurde der Versuch korrekt durchgeführt, erhalten die Lernenden für die Messung der scharfen Bombe deutlich höhere Werte. Sie messen in diesem Fall kein Minimum mehr, da das Interferenzmuster aufgrund des Komplementaritätsprinzips verschwunden ist.



**Abbildung 45: Die Attrappen für die scharfe Bombe (links) und den Blindgänger (rechts). Die Attrappe für den Blindgänger enthält ein Loch, sodass der Laserstrahl den Blindgänger ungehindert passieren kann.**

Der Versuch beschäftigt sich mit folgenden Themen:

- Aufbau und Funktionsweise des Michelson-Interferometers

Auch die Anleitungen des Knaller-Experiments enthalten eine beschriftete Versuchsskizze und die Funktionsweise einzelner Bestandteile.

- Interferenz von Wellen  
Im Rahmen der Grundlagen wird ebenfalls die Interferenz von Wellen wiederholt.
- Der Welle-Teilchen-Dualismus

Das Experiment beschäftigt sich explizit mit dem Welle-Teilchen-Dualismus. Die Ergebnisse basieren auf der Unterscheidung von Wellencharakter und Teilchencharakter. Verhält sich Licht wie eine Welle, kann das Interferenzmuster beobachtet werden.

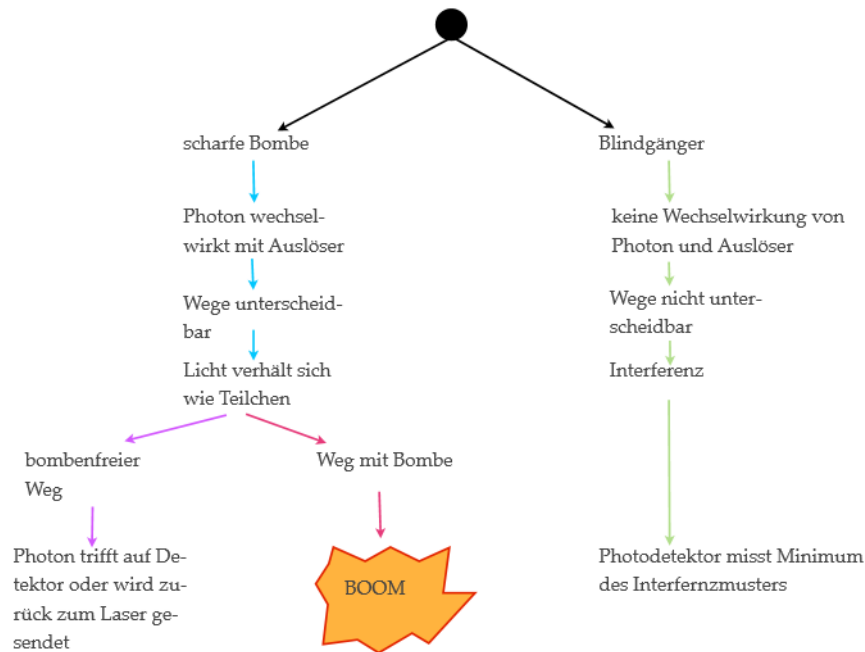
- Das Prinzip der wechselwirkungsfreien Quantenmessung

Das Gedankenexperiment, das zu Beginn der Versuchsanleitung erläutert wird, soll den Lernenden das Prinzip der wechselwirkungsfreien Quantenmessung näherbringen.

- Das Komplementaritätsprinzip

Wie im Versuch zum Quantenradierer können die Lernenden beobachten, dass die Welcher-Weg Information die Interferenz auslöscht. Die scharfe Bombe markiert einen der Interferometerarme. Ist die scharfe Bombe im Versuchsaufbau, können die Wege demnach unterschieden werden. Das Interferenzmuster verschwindet.

Folglich enthält das Experiment deutlich mehr Inhalte, von denen einige zudem sehr anspruchsvoll für Schülerinnen und Schüler der 10. Klasse sind. Aufgrund des hohen Anspruchs war es notwendig, einige Ergebnisse in der Anleitung vorwegzunehmen. Folgende Übersicht (Abbildung 46) sollte die Lernenden bei der Durchführung und Auswertung des Experimentes unterstützen.



**Abbildung 46: Übersicht – Knaller Experiment**

Das folgende Lernziel soll mit Hilfe des Kompetenztests überprüft werden.

- Die Lernenden nutzen das Komplementaritätsprinzip, um eine Beobachtung der Versuchsdurchführung zu erläutern.

Der Photodetektor misst höhere Werte, sobald sich die scharfe Bombe in einem der Interferometerarme befindet. Die Lernenden sollen die Ursache für diese Beobachtung angeben. Die gemessenen Werte des Voltmeters sind höher, da durch die scharfe Bombe einer der Arme markiert wird. Damit sind die Wege unterscheidbar und aufgrund des Komplementaritätsprinzips verschwindet die Interferenz. Da zuvor ein Minimum des Interferenzmusters gemessen wurde, sind die jetzt gemessenen Werte höher.



## *Entwicklung des Kurses und Anpassungen*

An dem Quantenphysikkurs haben insgesamt sieben 10. Klassen teilgenommen.

Bei den ersten Probedurchläufen ergaben sich hinsichtlich der Vorbereitungsphase einige Missverständnisse mit den Lehrkräften. Diese Klassen waren nicht bis wenig vorbereitet. Die Tests dieser Klassen wurden ausgewertet. Die Ergebnisse dieser ersten drei Klassen sind nicht in der Auswertung dieser Arbeit aufgeführt, da die Lernenden wenig bis gar nicht auf den Kurs vorbereitet waren. Die Beobachtung an diesen Terminen und der Vergleich mit den anderen Klassen zeigten allerdings, wie essentiell eine gute Vorbereitung für die Lernerfolge der Schülerinnen und Schüler ist.

Um weitere Missverständnisse bei der Kommunikation mit den Lehrkräften zu verhindern, wurde eine Übersicht zum Aufbau der Unterrichtsstunde vor dem Besuch im PhotonLab erstellt (A1.1). Diese erhielten die Lehrkräfte mit den anderen Materialien per Mail. Zuvor waren diese Informationen nur im Fließtext der Mail enthalten.

Zu den Materialien, die der Lehrkraft vorab zugeschickt wurden, zählt auch eine Übersicht der Versuche (A1.2). Diese kann von den Lehrkräften beispielsweise als Folie ausgedruckt werden, um sie den Lernenden in der Vorbereitungsphase zu zeigen. Neben einer kurzen Beschreibung der Experimente enthielt die Folie zudem eine Einschätzung des Anspruchs der einzelnen Versuche. Diese Einschätzung wurde aufgrund der Lerninhalte und des Umfangs der einzelnen Experimente getroffen. Die Versuche waren nach ansteigender Schwierigkeit geordnet. Die ersten drei Durchläufe zeigten, dass die ursprüngliche Ordnung der Versuche hinsichtlich der Schwierigkeit abgeändert werden musste. Die Versuche zum Quantenradierer und zur Quantenkryptographie wurden in der Reihenfolge vertauscht. Die Anleitung der Quantenkryptographie ist vergleichsweise sehr umfassend. Um den Versuch durchführen zu können, müssen die Lernenden die gesamte Anleitung ausführlich gelesen haben, was bei den ersten Durchgängen nicht der Fall war. Damit die Lernenden den Versuch besser einschätzen können, wurde die Reihenfolge auf der Übersichtsfolie abgeändert.

Alle zuvor beschriebenen Änderungen waren bei allen ausgewerteten Klassen bereits aktuell.

Diese ersten Durchläufe zeigten zudem, dass die Anleitungen für die Lernenden verständlich waren. Daher wurde an den Anleitungen selbst nichts verändert.

### 2.2.6 Testverfahren

Um den Quantenphysikkurs hinsichtlich kognitiver und affektiver Aspekte zu evaluieren, wurde ein zweiteiliger Test mit jeder Klasse durchgeführt. Dieser Test wurde von den Lernenden im Anschluss an die Laborphase im Schülerlabor durchgeführt. Bei dem ersten Teil handelt es sich um eine Kurzsкала zur intrinsischen Motivation nach Wilde et al. (2009) (A2.1), bei dem zweiten um einen Wissenstest, der sich mit den Kompetenzbereichen Fachwissen und Bewertung beschäftigt (A2.2).

#### **Kurzsкала intrinsischer Motivation (KIM)**

Neben den kognitiven Aspekten des Lernens soll zudem die intrinsische Motivation der Lernenden mit Hilfe der Kurzsкала zur intrinsischen Motivation (KIM) geprüft werden. Wie in Kapitel 2.1.1 bereits erläutert wurde, gibt es viele Arbeiten, die sich mit der Auswirkung von Schülerlaboren auf diese affektiven Komponenten beschäftigen.

Außerschulische Lernorte wie das PhotonLab können die intrinsische Motivation von Schülerinnen und Schülern steigern (Wilde et al., 2009, S. 33).

Die Kurzsкала intrinsischer Motivation ist eine Abwandlung des „Intrinsic Motivation Inventor“ von Deci und Ryan. Sie erfasst die folgenden vier Bereiche:

- Interesse/ Vergnügen
- Wahrgenommene Kompetenz
- Druck/ Anspannung
- Wahrgenommene Wahlfreiheit

(Wilde et al., 2009, S. 31)

#### **Wissenstest**

Durch den Quantenphysikkurs sollte nicht nur die intrinsische Motivation der Lernenden gefördert werden. Die Lernenden sollten zudem bestimmte Kompetenzen erwerben. Um diese kognitiven Aspekte des Lernens zu überprüfen, wurde ein Wissenstest entworfen. Dieser sollte die Kompetenzbereiche Fachwissen und Bewertung mit Hilfe verschiedener Aufgaben prüfen.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Aufgabenwahl des Wissenstest beschrieben.

Um kognitive Aspekte des Lernens zu prüfen, gibt es mehrere Aufgabentypen. Hierzu zählen Lückentextaufgaben, Multiple-Choice-Aufgaben, freie Aufgaben und viele andere (s. Kircher et al., 2009, S. 276ff).

Da die Klassen nicht unbegrenzt viel Zeit hatten, stand ein zeitlicher Rahmen von 30 Minuten für den gesamten Test zur Verfügung. Von dieser halben Stunde wurden 5 Minuten für die Bearbeitung der KIM eingeplant.

Um diese Bearbeitungszeit einhalten zu können, wurde ein Teil der Aufgaben in Multiple-Choice Form gestellt. Die Vor- und Nachteile von dieser Aufgabenart werden in diesem Kapitel noch näher beschrieben. Um auch komplexere Sachverhalte abzufragen, wurden zudem zwei freie Aufgaben formuliert. Beide beschäftigen sich mit dem Versuch, den die Lernenden vorbereitet und im PhotonLab durchgeführt haben. Der Multiple-Choice-Aufgabenteil soll allgemeines Fachwissen zur Wellenlehre und Quantenphysik prüfen. Dieses sollte größtenteils in der Vorbereitungsphase erworben worden sein.

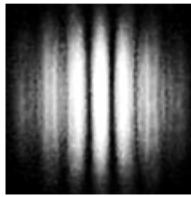
#### *Der Multiple-Choice-Aufgabenteil*

Dieser erste Aufgabenteil des Kompetenztests setzt sich aus vier Aufgaben in Multiple-Choice Form zusammen. Die Aufgaben finden sich in Abbildung 47.

Diese Aufgabenart besteht aus einer Aufgabenstellung und mehreren Antwortmöglichkeiten, zwischen denen die Lernenden wählen können. Im Gegensatz zu Lückentextaufgaben können mit Hilfe von Multiple-Choice-Aufgaben auch komplexere Sachverhalte überprüft werden. Entscheidend bei der Konstruktion dieser Aufgaben ist es, die falschen Antwortmöglichkeiten so zu formulieren, dass sie ohne das entscheidende Wissen zur Lösung nicht als falsch erkannt werden. Um die Reliabilität einer Multiple-Choice-Aufgabe zu verbessern, kann die Anzahl der zur Verfügung stehenden Antwortmöglichkeiten erhöht werden, man kann die Anzahl der Aufgaben in Multiple-Choice Form im Test erhöhen oder eine Begründung für die getroffene Wahl einfordern. Ein großer Vorteil dieses Aufgabenformats ist die hohe Auswertungsobjektivität. (s. Kircher et al., 2015, S. 260ff)

Bei den Ankreuzaufgaben können mehrere Antworten richtig sein. Kreuze alle Antworten an, die du für richtig hältst!

- 1) Kreuze an welche Aussage(n) für den Welle-Teilchen-Dualismus von Licht zutrifft/zutreffen:
- a. Licht zeigt in 50% aller Versuchsdurchläufe Teilcheneigenschaften und in den anderen Versuchsdurchläufen Welleneigenschaften.
  - b. Licht zeigt in manchen Versuchen Wellen- und in anderen Teilcheneigenschaften.
  - c. Welche Eigenschaften Licht zeigt hängt vom Versuch ab.
  - d. Welche Eigenschaften Licht zeigt ist unabhängig vom Versuch.
- 2) Du führst im PhotonLab einen Versuch mit Laserlicht durch und kannst auf einem Schirm folgendes Muster beobachten:



Was kannst du nun mit Sicherheit über den Versuch sagen:

- a. Licht zeigt im Versuch nie Welleneigenschaften
  - b. Licht zeigt im Versuch Welleneigenschaften
  - c. Das Muster entsteht durch die Überlagerung von 2 oder mehr Lichtwellen
  - d. Das Muster entsteht durch Photonen, die miteinander stoßen und voneinander abprallen
  - e. Das Muster nennt man Interferenzmuster
- 3) Welche Aussage(n) trifft/treffen für das Doppelspaltexperiment zu:
- a. Sind beide Spalte geöffnet können wir ein Interferenzmuster beobachten.
  - b. Verschließen wir einen der Spalte ändert sich nichts
  - c. Verschließen wir einen der Spalte verschwindet das Interferenzmuster
  - d. Die Aussagen b. und c. hängen davon ab welcher Spalt verschlossen wird
- 4) Kreuze die Aussage(n) an, die man als Ergebnisse des Doppelspaltexperiments erhält:
- a. Licht zeigt Teilcheneigenschaften
  - b. Licht zeigt Welleneigenschaften
  - c. Nur Laserlicht zeigt Welleneigenschaften
  - d. Nur Laserlicht zeigt Teilcheneigenschaften
  - e. Keine der obigen Aussagen sind Ergebnisse des Doppelspaltexperiments

Abbildung 47: Multiple-Choice-Aufgaben mit Lösung

Zudem können die Aufgaben schnell und einfach ausgewertet werden, da die gesetzten Kreuze nur mit der Musterlösung verglichen werden.

Um den zeitlichen Rahmen einzuhalten, wurden nur vier Multiple-Choice-Fragen formuliert. Zwei davon enthalten vier Antwortmöglichkeiten, die anderen beiden Aufgaben

fünf. Es wurde darauf geachtet, dass die Lernenden nicht über Ausschlussverfahren die richtigen Antworten erraten können.

Um die Aufgaben komplexer zu gestalten, sind zum Teil mehrere Antwortmöglichkeiten korrekt. Die Lernenden werden sowohl in der Aufgabenstellung als auch zu Beginn des Tests darauf hingewiesen.

### *Die Aufgaben mit freier Antwort*

Da sich die Lernenden im Quantenphysikkurs mit unterschiedlichen Versuchen beschäftigen, sollte sich der zweite Teil des Kompetenztests diesem Experiment widmen. Hierzu boten sich Aufgaben mit freier Antwort an. Es wurden zwei Aufgaben dieser Art entworfen. Der Erwartungshorizont zu beiden Aufgaben findet sich im Anhang (s. A3).

Die erste Aufgabe (s. Abbildung 48) soll überprüfen, ob die Lernenden in der Lage sind, eine beschriftete Skizze ihres Versuchsaufbaus anzufertigen. Zudem sollen sie einen möglichen Strahlengang einzeichnen.

5) Im PhotonLab hast du dich ausführlich mit einem Versuch beschäftigt. Fertige eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus des Versuches an.

**Hinweis:** Die Skizzen müssen nur die Bestandteile enthalten, die für deinen Versuch wichtig sind. (Du musst beispielsweise kein Mikroskop in aller Einzelheit zeichnen, falls das zu deinem Versuchsaufbau gehört. Falls du den Versuch Quantenkryptographie durchgeführt hast, reicht es nur eine Hälfte (Alice und Bob) des Versuchsaufbaus zu skizzieren.) **Zeichne einen möglichen Strahlengang des Laserlichts ein.**

Abbildung 48: Erste Aufgabe mit freier Antwort im Wissenstest

In der zweiten Aufgabe (s. Abbildung 49) ist eine Beobachtung zu jedem der Versuche formuliert. Zudem ist eine fachlich nicht korrekte Begründung für diese Beobachtung angegeben. Die Lernenden sollen entscheiden, ob die angegebene Begründung richtig ist. Stufen sie die Begründung als falsch ein, sollen sie die richtige Ursache für die Beobachtung kurz erläutern.

- 6) Die folgende Tabelle enthält Beobachtungen zu allen Experimenten. Gib an, ob die Begründung, die für die Beobachtung zu deinem Experiment angegeben ist, korrekt ist. Falls die Aussage falsch ist, ergänze deine Bewertung um die richtige Begründung (unten). **Bewerte nur die Begründung zu deinem Experiment!!**

Versuch	Beobachtung	Begründung	Richtig/Falsch
Quantenradierer	In einem Interferometer verschwindet das Interferenzmuster auf dem Schirm, wenn wir einen Polarisator ( $90^\circ$ ) in einen der Interferometerarme stellen.	Das Interferenzmuster verschwindet, da der Polarisator den Interferometerarm blockiert und somit kein Licht diesen Arm durchlaufen kann.	
Michelson-Interferometer	Drehen wir im Michelson-Interferometer an der Mikrometerschraube, verändert sich das Interferenzmuster auf dem Schirm.	Das Interferenzmuster verändert sich, da das Licht vom Strahlteiler in einem anderen Verhältnis aufgespalten wird.	
Quantenkryptographie	Drehen wir den Polarisationsdreher von Alice auf $45^\circ$ und den von Bob auf $0^\circ$ erhalten wir zufällig eine 0 oder 1.	Das Ergebnis ist zufällig, da das um $45^\circ$ polarisierte Licht den $0^\circ$ Polarisationsdreher nicht passieren kann.	
Optische Pinzette	Wir können nur wenige Mikrometer große Teilchen mit Hilfe eines fokussierten Lasers festhalten und verschieben.	Das ist möglich, da der Laserfokus ein kleines Loch in unsere Probe brennt und das Teilchen dort hineinfällt.	
Knaller Experiment	Markieren wir einen der Interferometerarme, so misst unser Photodetektor ein stärkeres Signal, als wenn wir beide Arme frei lassen.	Das Signal ist stärker, da das Licht nun nur den nicht markierten Weg nimmt.	

Abbildung 49: Zweite Aufgabe mit freier Antwort des Wissenstests

### *Einordnung in Kompetenzbereiche*

Gemäß Kircher et al. (2015, S. 94) werden vier Kompetenzbereiche im Physikunterricht unterschieden: das Fachwissen, die Kommunikation, die Erkenntnisgewinnung und die Bewertung. Das Fachwissen beinhaltet alles Wissen über Begriffe, physikalische Phänomene, Modelle, Gesetzmäßigkeiten und Fakten. Der Kompetenzbereich Kommunika-

tion beschäftigt sich mit der adressaten und sachbezogenen Darstellung von Inhalten. Dazu zählt die Anwendung von Fachsprache, Präsentation und Diskussion von Lerninhalten. Auch der Umgang mit Graphiken, Tabellen und Texten und das Dokumentieren von Versuchsergebnissen fallen in diesen Kompetenzbereich. Zur Erkenntnisgewinnung zählen das Nutzen von Modellen und Experimentiertechniken. Aufgaben, in denen die Lernenden ihr physikalisches Denken nutzen, um Phänomene zu erklären oder zu bewerten, zählen zu dem Bereich Bewertung. Hierzu zählt auch das Erkennen unphysikalischer Aussagen. (Kircher et al., 2015, S. 94ff)

Gemäß dieser Beschreibung der Kompetenzbereiche, werden die für den Wissenstest entworfenen Aufgaben wie folgt versucht zuzuordnen.

Der Multiple-Choice- Aufgabenteil enthält wie in Abbildung 46 zu sehen ist, nur Fragen zum Welle-Teilchen-Dualismus. Da diese Aufgaben nur Wissen, das von den Lernenden in der Vorbereitungsphase und im Einführungsvortrag erworben werden konnte, abfragen, werden diese Aufgaben dem Bereich Fachwissen zugeordnet.

Die erste Aufgabe mit freier Antwort kann ebenfalls dem Bereich Fachwissen sowie dem Bereich Kommunikation zugeordnet werden. Aus den Anleitungen kennen die Lernenden den Versuchsaufbau und müssen so ihr erworbenes Fachwissen wiedergeben. Die Aufgabe verlangt darüber hinaus, dass die Schülerinnen und Schüler den Versuchsaufbau geeignet skizzieren. Dies kann dem Kompetenzbereich Kommunikation zugeordnet werden.

Da die zweite Aufgabe sowohl Fachwissen, in Form der richtigen Begründung, als auch das Erkennen der falschen Aussage erfordert, kann sie den Kompetenzbereichen Fachwissen und Bewertung zugeordnet werden.

### 2.2.7 Schulklassen

Sieben 10. Klassen nahmen an dem Quantenphysikkurs im PhotonLab teil. Aufgrund mangelnder Vorbereitung wurden die ersten drei nicht in die Auswertung dieser Arbeit integriert. Die verbleibenden vier Klassen nahmen alle innerhalb eines Zeitraums von 2 Wochen (s. Tabelle 1) an dem Kurs teil. Bei zweien (10-3 und 10-4) handelte es sich zufälligerweise um reine Mädchenklassen. Der Kurs wurde zudem von zwei 11.Klassen absolviert. Die Auswertung dieser Klassen sollte prüfen, wie valide der Wissenstest die Erfüllung der Lernziele misst. Die Kurse fanden zwischen dem 21. Juni und 12. Juli 2017 statt.

Ein Überblick über die Schulklassen findet sich in der folgenden Abbildung (50).

Datum des Besuchs im PhotonLab	Bezeichnung	Jgst.	Klasse eines naturwissenschaftlichen Gymnasiums	Anzahl der Schülerinnen	Anzahl der Schüler	Gruppe wurde aufgeteilt
21.06.17	10-1	10	Ja	6	22	Ja
22.06.17	10-2	10	Ja	4	23	Ja
3.07.17	10-3	10	Nein	22	0	Ja
4.07.17	10-4	10	Ja	11	0	Nein
5.07.17	11-1	11	-	8	11	Nein
12.07.17	11-2	11	-	15	26	Ja

Abbildung 50: Übersicht über die Schulklassen

Die Klassen 10-1,10-2 und 10-4 besuchten ein naturwissenschaftliches, die Klasse 10-3 ein neusprachliches Gymnasium. Bei den 11. Klassen handelte es sich jeweils um den Physikkurs der Jahrgangsstufe. Alle Schülerinnen und Schüler füllten den KIM sowie den Kompetenztest aus. Alle Lernenden hatten ihre Versuche im Unterricht bereits verteilt und in den Gruppen kurz besprochen. Schülerantworten auf Fragen während des Einführungsvortrags zeigten, dass einige der Lernenden das Doppelspaltexperiment aus dem Video „Dr. Quantum“ bereits kannten und Begriffe wie konstruktive und destruktive Interferenz benutzten.



Die 10. Klassen, im Folgenden 10-1 bis 10-4 (s. obige Tabelle), verhielten sich im Allgemeinen unruhiger als die 11. Klassen, 11-1 und 11.2, was sich vermutlich auf die Klassengröße und das Durchschnittsalter der Lernenden zurückführen lässt. Die 10. Klassen beteiligten sich jedoch aktiver durch Fragen und Antworten am Einführungsvortrag.

Hervorzuheben ist die 11. Klasse, die am 12.07.17 das PhotonLab besuchte, 11-2. Die Klasse war nach Aussage der Lehrkraft herausragend gut vorbereitet. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Physiklehrkraft der Klasse zwei Unterrichtsstunden für die Vorbereitungsphase einplante und die Präsentationen zu den Versuchen bereits in der Stunde vor dem Quantenphysikkurs halten ließ. Die Lehrkräfte der anderen Klassen führten die Vorbereitungsphase in einer Unterrichtsstunde durch. Die Präsentationen dieser Klassen fanden, wie geplant, erst in der Nachbereitungsphase statt. Grundsätzlich war es den Lehrkräften frei gestellt, wie viel Zeit sie für die Vorbereitungsphase in Anspruch nehmen. Jedoch sollte mindestens eine Unterrichtsstunde dafür eingeplant werden.

## 3 Auswertung und Ergebnisse

In dem folgenden Kapitel wird zunächst erläutert, wie die verschiedenen Aufgaben der KIM und des Wissenstests ausgewertet wurden. Im Anschluss sind die Ergebnisse des Testverfahrens für die 10. und 11.Klassen aufgeführt. Die Rohwerte des Testverfahrens befinden sich in Form einer Excel-Tabelle auf einer der Arbeit beigefügten CD.

### 3.1 Beschreibung der Auswertung

#### 3.1.1 Die Auswertung der KIM

Der Quantenphysikkurs im PhotonLab schreibt jedem Lernenden einen konkreten Versuch vor, dessen Durchführung aufgrund seiner Komplexität in den Anleitungen genau beschrieben ist. Daher wurde der Teil des Tests, der die wahrgenommene Wahlfreiheit bestimmen soll, nicht durchgeführt.

Für jede der drei übrigen Kriterien (s. Kapitel 2.2.6) können die Lernenden zwischen 0 und 4 Punkten vergeben, je nachdem wie sehr sie mit den gegebenen Aussagen übereinstimmen.

Der Test arbeitet hierbei mit einer fünfstufigen Likert-Skala, die folgende Stufen unterscheidet:

- 0 : stimmt gar nicht
- 1 : stimmt ein wenig
- 2: stimmt teils teils
- 3: stimmt ziemlich
- 4: stimmt völlig

(Wilde et al., 2009, S.36)

Bei der Auswertung wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der angekreuzten Punkte für die gesamte KIM gebildet. Da hohe Werte für die Bereiche Interesse und wahrgenommene Kompetenz, aber niedrige Werte für Druck und Anspannung wünschenswert sind, wurden die Ergebnisse für diesen letzten Bereich umgerechnet. Die angekreuzten Werte W wurden dabei im Kapitel 3.2 zu 4-W geändert, um mit den anderen verglichen werden zu können.

### 3.1.2 Die Auswertung des Wissenstests

#### Der Multiple-Choice-Aufgabenteil

Die Lernenden erhielten für jede korrekt angekreuzte und für jede korrekt nicht angekreuzte Antwortmöglichkeit einen Punkt. Für jede angekreuzte falsche Antwort und jede nicht angekreuzte richtige Antwort wurde ein Punkt abgezogen. Insgesamt waren negative Punkte möglich. Die maximal zu erreichende Punktzahl waren 18 Punkte.

Die Lernenden erhielten auf diesen Aufgabenteil Schulnoten nach der folgenden linearen Verteilung (Abbildung 51):

Punktzahl im Test	Note
18-16	1
15-13	2
12-10	3
9-7	4
6-4	5
$\leq 3$	6

Abbildung 51: Auswertung des Multiple-Choice Aufgabenteils – Aufteilung der Gruppen

Dieser Aufgabenteil wurde nur getrennt nach Jahrgangsstufen und Klassen ausgewertet, da keine Inhalte abgefragt wurden, die sich auf die spezifischen Versuche beziehen.

#### Die Aufgaben mit freier Antwort

Der Test enthielt zwei Aufgaben dieser Form. Die Aufgaben wurden getrennt ausgewertet. Im Gegensatz zum Multiple-Choice-Aufgabenteil, der unabhängig vom gewählten Experiment für alle Schülerinnen und Schüler identisch war, beschäftigten sich die beiden Aufgaben mit freier Antwort ausschließlich mit dem speziellen Versuch, der von der jeweiligen Gruppe im PhotonLab durchgeführt wurde.

Die Lernenden sollten im Zuge der ersten Aufgabe eine beschriftete Skizze ihres Versuches anfertigen und einen möglichen Strahlengang einzeichnen. Diese Aufgaben wurden mit Schulnoten hinsichtlich folgender Punkte bewertet:

- Vollständigkeit der Skizze
- Korrekte Beschriftung aller für den spezifischen Aufbau essentiellen Komponenten

- Verwendung von Fachbegriffen
- Einzeichnen eines korrekten Strahlengangs
- Übersichtlichkeit der Skizze

Die Note 1 wurde nur dann vergeben, wenn die Skizze alle Kriterien erfüllte. Jedes nicht erfüllte Kriterium verschlechterte die Note um eine Stufe.

Es wurden nicht nur die Bewertungen der Versuchsskizzen der Klassen, sondern auch der einzelnen Experimentiergruppen verglichen, um herauszufinden, bei welchem Experiment noch Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Darstellung des Versuchsaufbaus besteht und bei welchem Experiment diese gut angenommen wurde.

In der zweiten Aufgabe sollten die Lernenden eine angegebene Begründung als falsch erkennen. Zudem sollten sie diese falsche Aussage verbessern. Die Lernenden erhielten einen Punkt, wenn sie die Aufgabe als falsch bewerteten und einen weiteren Punkt für die richtige Verbesserung.

Diese Aufgabe enthält für jedes der Experimente unterschiedliche Aussagen. Sie wird wie die Aufgabe zu den Versuchsskizzen einmal nach Klassen und einmal nach Experimentiergruppen ausgewertet werden. Dies soll zeigen, ob eines der Experimente eventuell zu komplex für die 10. Jahrgangsstufe ist.

### 3.2 Die Ergebnisse der KIM

In folgendem Kapitel werden die Ergebnisse aller 10. und aller 11.Klassen gegenübergestellt. Im Anschluss werden die Resultate getrennt nach einzelnen Klassen und getrennt nach Versuchsgruppen dargestellt.



Abbildung 52: KIM – Ergebnisse der 10.Klassen

Die Auswertung der 10. Klassen (s. Abbildung 52) ergab einen Mittelwert von 2,83 und eine Standardabweichung von 1,03. Damit liegen die 10.Klassen über dem durchschnittlichen Wert der Skala (2,00).



Abbildung 53: KIM - Ergebnisse der 11.Klassen

Die Auswertung der 11.Klassen ergab insgesamt einen etwas niedrigeren Mittelwert von 2,75 und eine Standardabweichung von 0,98. Die angekreuzten Werte der Lernenden finden sich in Abbildung 53. Auch die 11.Klassen liegen über dem Durchschnittswert.

Die folgende Tabelle (s. Abbildung 54) zeigt die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der einzelnen Klassen.

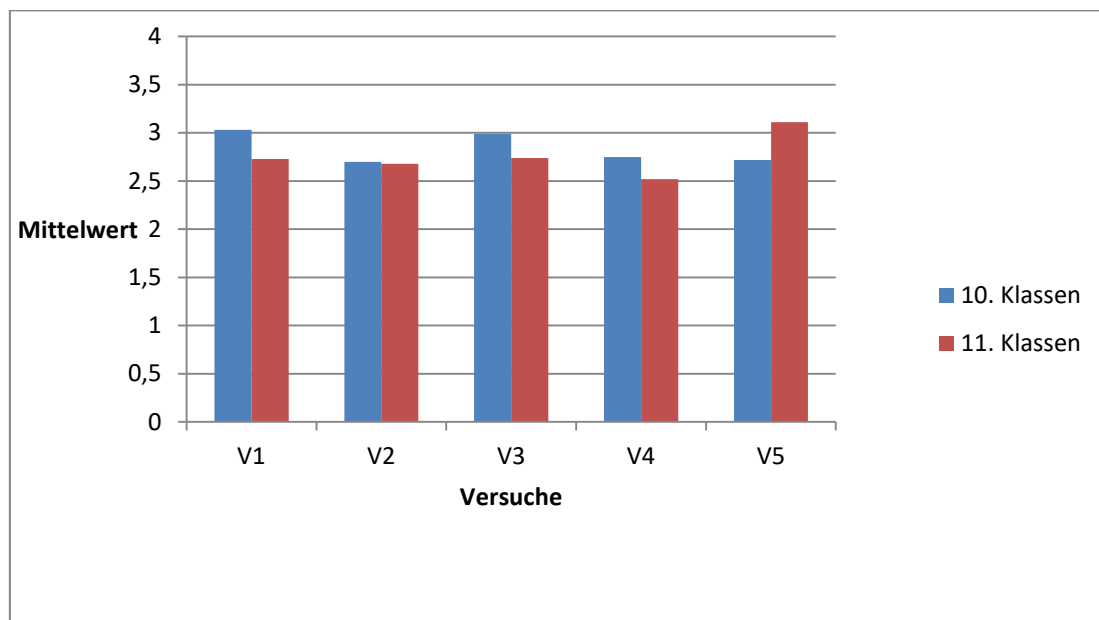
Klasse	10-1	10-2	10-3	10-4	11-1	11-2
M	2,92	2,84	2,54	3,18	2,73	2,75
SD	1,00	1,11	1,03	0,75	0,97	0,99

**Abbildung 54 : KIM - Ergebnisse nach Klassen**

Dabei ist auffällig, dass die Klasse 10-4 durchschnittlich die höchsten Werte für die intrinsische Motivation angab und die Klasse 10-3 die niedrigsten. Alle Klassen lagen jedoch über dem durchschnittlichen Wert von 2,00.

In Abbildung 55 sind die Mittelwerte der einzelnen Versuchsgruppen der 10. und 11.Klassen dargestellt. Die Versuche sind dabei wie folgt benannt:

- V1: Michelson-Interferometer
- V2: Optische Pinzette
- V3: Quantenradierer
- V4: Quantenkryptographie
- V5: Knaller-Experiment



**Abbildung 55: KIM - Ergebnisse nach Versuchsgruppen**

Auch die einzelnen Versuchsgruppen gaben durchschnittlich einen höheren Wert für intrinsische Motivation als 2,00 an. Dabei ist die intrinsische Motivation bei den 10.Klassen bei allen Experimenten bis auf V5 höher als die der 11.Klassen. Diese

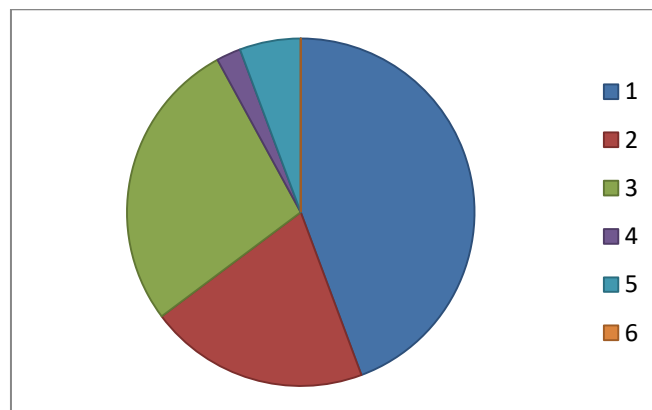
Gruppen der 11.Klasse gaben mit einem Wert von 3,11 durchschnittlich die höchsten Werte für intrinsische Motivation, verglichen mit den anderen Versuchsgruppen, an.

### 3.3 Die Ergebnisse des Wissenstests

Im folgenden Kapitel sind die Resultate des Wissenstest aufgeführt. Hierbei werden zunächst die Ergebnisse der Lernenden im Wissenstest und im Anschluss die Auswertung der Aufgaben mit freier Antwort dargestellt. Bei beiden Aufgabenteilen werden zunächst die Ergebnisse der 10. und die Ergebnisse der 11.Klassen gegenübergestellt. Für die Aufgaben mit freier Antwort, die sich mit den spezifischen Experimenten beschäftigen, wurden die Resultate zudem getrennt nach Versuchsgruppen ausgewertet.

#### 3.3.1 Die Ergebnisse des Multiple-Choice Aufgabenteils

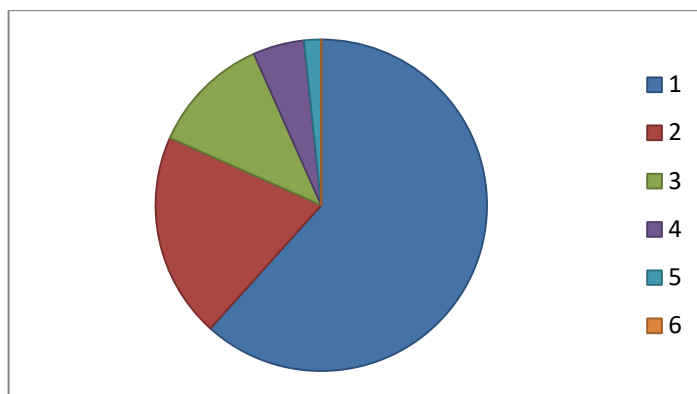
Die Abbildung 56 zeigt die Notenverteilung der 10.Klassen, Abbildung 57 die der 11.Klassen im Multiple-Choice Aufgabenteil. Die 10. Klassen erzielten eine Durchschnittsnote von 2,05 mit einer Standardabweichung von 1,15.



**Abbildung 56: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse der 10.Klassen**

Die 11.Klassen erzielten insgesamt bessere Ergebnisse als die 10.Klassen. Die Auswertung dieser Jahrgangsstufe ergab eine Durchschnittsnote von 1,65 mit einer Standardabweichung von 0,99. Allerdings ist der Abstand zwischen der Durchschnittsnote der 10.Klassen und der 11.Klassen geringer als die Standardabweichungen. Auch die Mittelwerte in der KIM weichen weniger als eine Standardabweichung voneinander ab. Da nur vier 10.Klassen und zwei 11.Klassen ausgewertet wurden, ergeben sich große Standardabweichungen. Dies ist auch bei den anderen Aufgaben des Wissenstests der Fall. Daher müssen die Aussagen, die diesbezüglich getroffen werden mit einiger Vorsicht betrachtet werden.





**Abbildung 57: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse der 11.Klassen**

Die Auswertung beider Jahrgangsstufen zeigte, dass die Lernenden alle mindestens die Note 5 in diesem Aufgabenteil erlangten. Auffällig ist der hohe Anteil an Lernenden beider Jahrgangsstufen, die eine 1 erzielten. Bei den Lernenden der 11.Klassen gelang dies sogar über der Hälfte aller Schülerinnen und Schüler.

Die folgenden Tabelle (Abbildung 58) zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Klassen. Auffällig hierbei ist, dass die Klasse 11-2 insgesamt ein deutlich besseres Ergebnis erzielte als 11-1. Die Klasse 10-3 schnitt mit einer durchschnittlichen Note von 2,45 am schlechtesten ab. Alle Klassen lagen über einer Durchschnittsnote von 2,5.

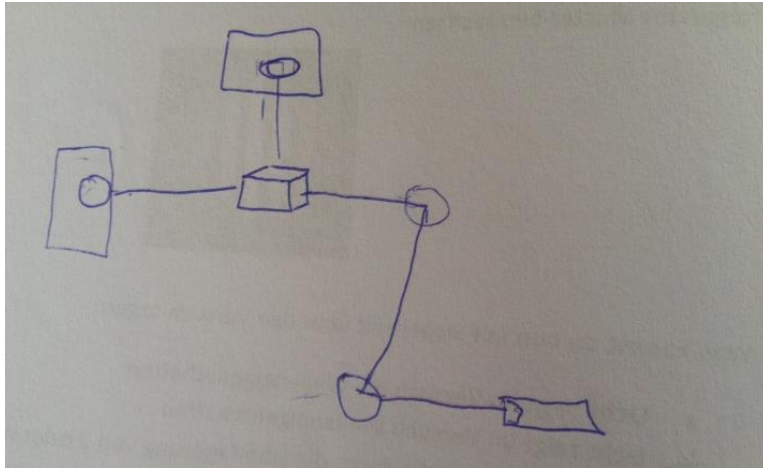
Klassen	10-1	10-2	10-3	10-4	11-1	11-2
M	1,79	1,93	2,45	2,18	2,00	1,49
SD	1,10	1,21	1,01	1,33	1,29	0,78

**Abbildung 58: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse getrennt nach Klassen**

### 3.3.2 Die Ergebnisse der erste Aufgabe

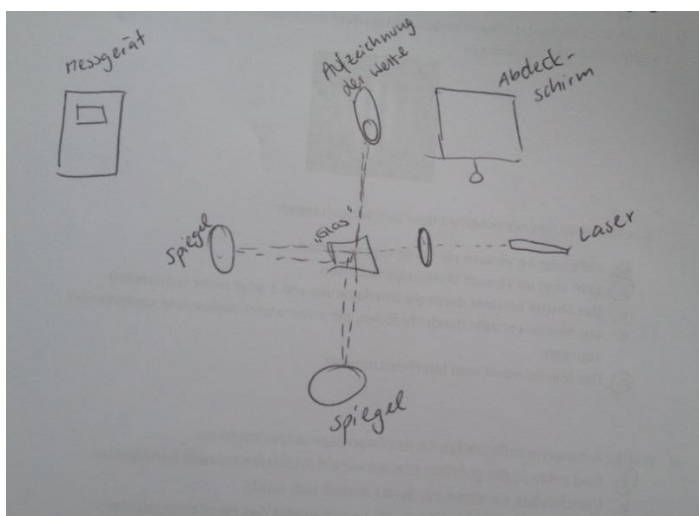
Im folgenden Abschnitt sind zunächst Beispiele für Bearbeitungen dieser Aufgabe und deren Bewertung dargestellt. Im Anschluss findet sich die Auswertung der Klassen.

Alle Bearbeitungen wurden von Lernenden angefertigt, die das Knaller Experiment durchgeführt hatten, da die Bearbeitung dieser Gruppen gute Beispiele lieferten.



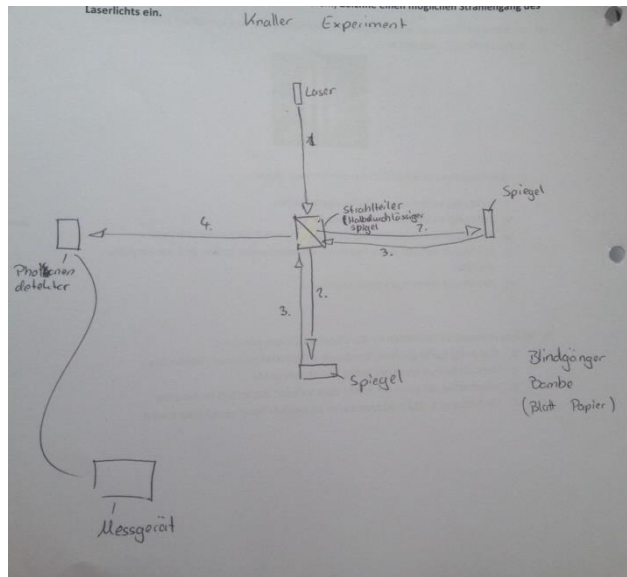
**Abbildung 59: Beispiel einer ungenügenden Versuchsskizze**

Die Abbildung 59 zeigt ein Beispiel für eine Bearbeitung, die als ungenügend bewertet wurde. Es fehlen jegliche Beschriftungen, der eingezeichnete Strahlengang ist nicht nachvollziehbar und es fehlen wichtige Komponenten des Versuches. Insgesamt war es unmöglich, ausschließlich anhand dieser Bearbeitung festzustellen um welchen Versuch es sich handelte. Erst die Bearbeitung der zugehörigen Bewertungsaufgabe gab Aufschluss darüber.



**Abbildung 60: Beispiel für eine ausreichende Versuchsskizze**

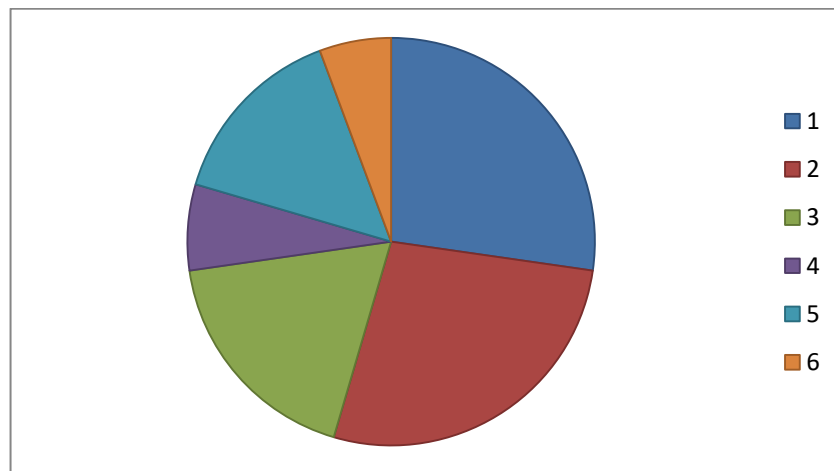
Ein Beispiel für eine ausreichende Bearbeitung findet sich in Abbildung 60. Der grundsätzliche Aufbau stimmt, allerdings fehlen wichtige Begriffe wie beispielsweise „Strahlteiler“ und „Photonendetektor“. Zudem ist unklar welchen Zweck das Messgerät erfüllen soll, da es mit keiner Komponente verbunden wurde.



**Abbildung 61: Beispiel für eine sehr gute Versuchsskizze**

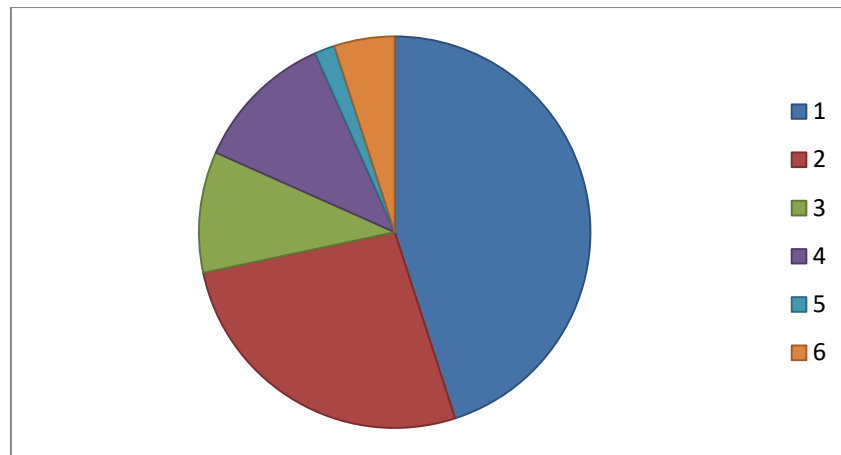
Eine sehr gute Bearbeitung der Aufgabe findet sich in Abbildung 61. Alle wichtigen Bestandteile des Versuches sind korrekt eingezeichnet und richtig beschriftet. Der Strahlengang ist klar nachvollziehbar.

In Abbildung 62 findet sich die Notenverteilung der 10. Klassen. Die Lernenden erreichten eine Durchschnittsnote von 2,72 mit einer Standardabweichung von 1,58.



**Abbildung 62: 1. Aufgabe - Ergebnisse der 10.Klassen**

Die Lernenden der 11.Klassen schnitten auch hier mit einer durchschnittlichen Leistung von 2,13 besser ab. Die Standardabweichung ergab 1,41 Notenpunkte. Die Resultate dieser Jahrgangsstufe sind in Abbildung 63 abgebildet.



**Abbildung 63: 1.Aufgabe - Ergebnisse der 11.Klassen**

Die Auswertung der einzelnen Klassen ergab, dass die Klasse 10-3, die im vorigen Aufgabenteil am schlechtesten abschnitt, in dieser Aufgabe die besten Leistungen erzielte. Die Lernenden der Klasse 10-1 schnitten durchschnittlich am schlechtesten ab. Diese Klasse lag mit einer durchschnittlichen Note von 3,32 als einzige unter einem Schnitt von 3,0. Die Klasse 11-2 schnitt erneut besser ab als 11-1. (s. Abbildung 64)

Klassen	10-1	10-2	10-3	10-4	11-1	11-2
M	3,32	2,96	1,95	2,09	2,37	2,02
SD	1,63	1,65	1,33	0,83	1,57	1,33

**Abbildung 64: 1. Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Klassen**

Der Vergleich der einzelnen Versuchsgruppen ist in Abbildung 65 dargestellt. Dieser Vergleich wird angestellt, um zu prüfen, ob eines der ausgewählten Experimente zu anspruchsvoll für die 10. Jahrgangsstufe ist. Zudem soll der Vergleich durch die Auswertung der versuchsspezifischen Aufgaben des Kompetenztests Aufschluss darüber geben, ob die Anleitungen in manchen Fällen noch weiterentwickelt werden sollten.

Auffällig ist, dass die Versuchsgruppen zum Michelson Interferometer (V1) der 10.Klassen deutlich besser abschnitten als die anderen Versuchsgruppen. Bei den 11.Klassen erzielten die Gruppen, die das Knaller Experiment (V5) durchgeführt hatten, die besten Leistungen. Bei beiden Jahrgangsstufen schnitten die Gruppen, die sich mit der optischen Pinzette (V3) beschäftigen, am schlechtesten ab. Interessanterweise erzielten die Gruppen der 11.Klassen bei diesem Versuch schlechtere Ergebnisse als die 10.Klassen. In allen anderen Versuchen waren die Durchschnittsnoten der 11.Klassen verglichen mit denen der 10.Klassen besser. Zwischen der Resultaten der V3-Gruppen

und den übrigen Versuchsgruppen der 11.Klassen liegt bei allen mehr als ein Notenpunkt.

Versuche	V1	V2	V3	V4	V5
10.Klasse	2,00	3,18	2,87	2,95	2,44
11.Klasse	1,71	3,33	2,00	2,07	1,58

Abbildung 65: 1. Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Versuchsgruppen

### 3.3.3 Die Ergebnisse der zweiten Aufgabe

Die Ergebnisse der 10. Klassen in der zweiten Aufgabe mit freier Antwort finden sich in Abbildung 66. Die Auswertung ergab einen Mittelwert von 0,68 Pkt. mit einer Standardabweichung von 0,8 Pkt.. Die 10.Klassen lagen insgesamt unter einer durchschnittlich zu erreichenden Punktzahl von 1,0 Pkt.. Über die Hälfte der Lernenden erlangte keinen Punkt für die Bearbeitung dieser Aufgabe.

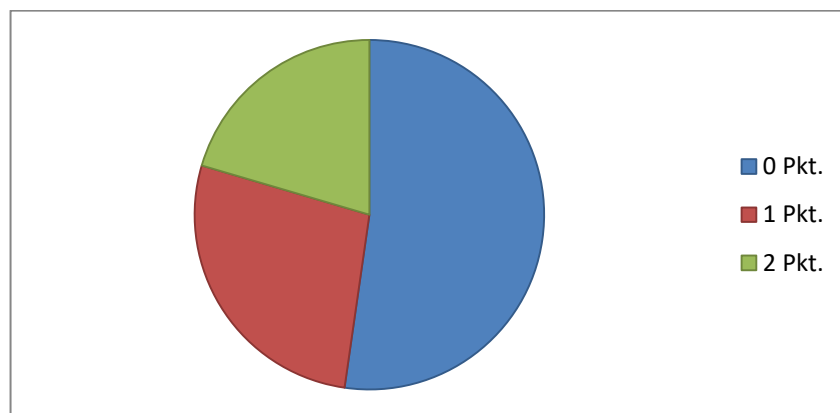
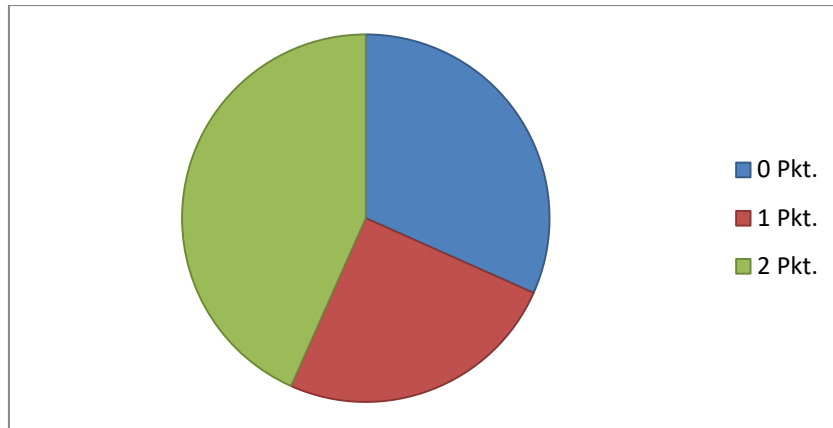


Abbildung 66: 2.Aufgabe - Ergebnisse der 10.Klassen

Die 11. Klassen schnitten mit einer durchschnittlich erreichten Punktzahl von 1,12 Pkt. besser ab. Die Auswertung ergab hierbei eine Standardabweichung von 0,87 Pkt.. Abbildung 67 zeigt die Resultate der 11.Klassen.



**Abbildung 67: 2.Aufgabe - Ergebnisse der 11.Klassen**

Ein Vergleich der einzelnen Klassen (s. Abbildung 68) zeigt, dass die 11.Klassen durchschnittlich bessere Ergebnisse erzielten als die Klassen der 10. Jahrgangsstufe. Jedoch erzielte nur die Klasse 11-2 eine durchschnittliche Punktzahl über 1,00 Pkt..

Klassen	10-1	10-2	10-3	10-4	11-1	11-2
M	0,79	0,65	0,68	0,55	0,84	1,24
SD	0,88	0,85	0,78	0,52	0,83	0,86

**Abbildung 68: 2.Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Klassen**

Die Abbildung 69 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Versuchsgruppen beider Jahrgangsstufen. Zu erkennen ist, dass die Versuchsgruppen der 11.Klassen durchschnittlich in allen Versuchen bessere Leistungen erzielten bis auf die Gruppen, die die optische Pinzette (V3) durchführten. Auffällig ist darüber hinaus der große Abstand zwischen den Ergebnissen der 10. und 11.Klassen bei dem Versuch zum „Knaller-Experiment“ (V5).

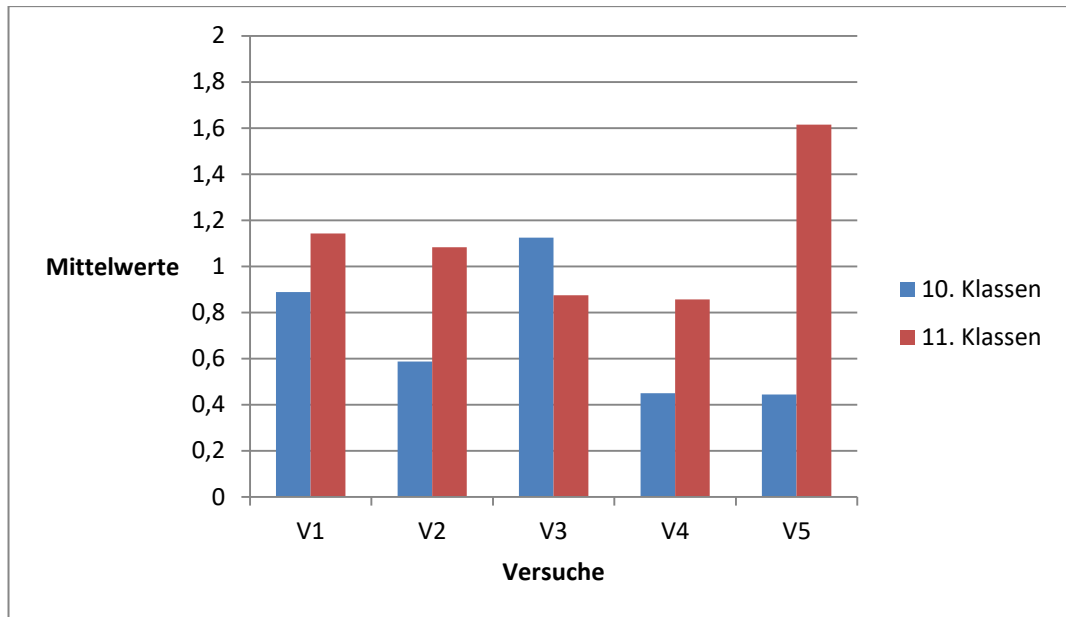


Abbildung 69: 2. Aufgabe - Mittelwerte der einzelnen Versuchsgruppen getrennt nach Klassen

## 4 Diskussion

In folgendem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der KIM und im Anschluss die Resultate des Wissenstest diskutiert. Dabei wird vor allem auf die in Kapitel 3 erwähnten Auffälligkeiten eingegangen.

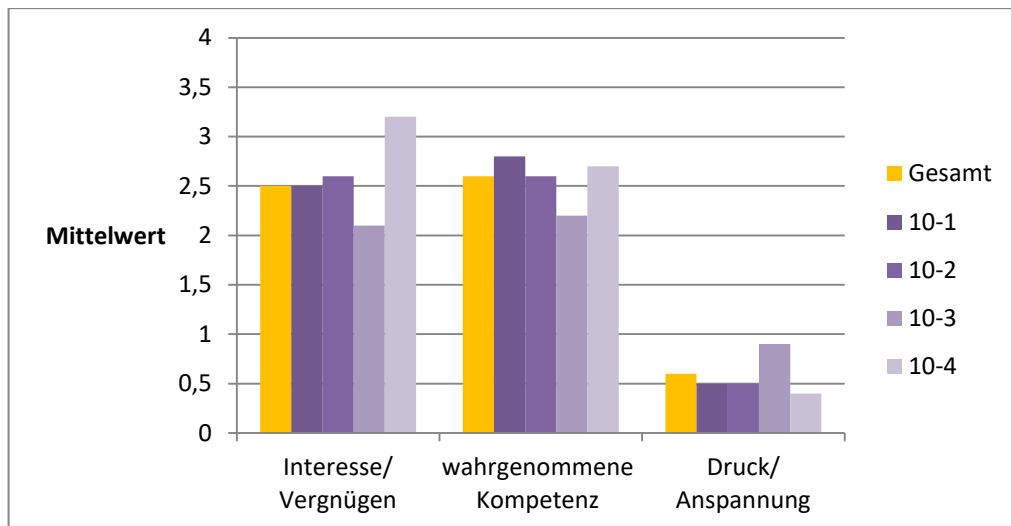
### 4.1 Die Diskussion der KIM

Insgesamt lässt sich sagen, dass der entworfene Kurs hinsichtlich der intrinsischen Motivation gute Werte erzielte. Die Auswertung der KIM ergab für beide Jahrgangsstufen einen Mittelwert für die intrinsische Motivation, der über einem Durchschnittswert der Skala von 2,0 lag. Dabei ergab die Auswertung der 10.Klassen einen etwas höheren Mittelwert als die der 11.Klassen.

Der vergleichsweise niedrige Mittelwert von Klasse 10-3, könnte darauf zurückzuführen sein, dass es sich hierbei um die einzige Klasse, die kein naturwissenschaftliches Gymnasium besuchte, handelt. Die Beobachtung im Schülerlabor zeigte, dass diese Klasse im Vergleich mehr Zeit für die Versuche benötigte und die Lernenden zum Teil zurückhaltend im Umgang mit den Experimenten waren. Eine getrennte Auswertung der einzelnen Bereiche der KIM (s. Abbildung 70) ergab zudem, dass die Klasse 10-3 durchschnittlich höhere Rohwerte im Bereich Druck und Anspannung und niedrigere Werte im Bereich wahrgenommene Kompetenz angab. Im neusprachlichen Gymnasium haben die Lernenden weniger Stunden im Fach Physik. Dadurch sind die Lernenden dieses Gymnasium weniger vertraut im Umgang mit Versuchen. Die Ergebnisse in den Bereichen Druck und wahrgenommene Kompetenz könnten auf diese Unvertrautheit zurückzuführen sein. Da sich die Lernenden für das sprachliche Gymnasium entschieden haben, ist es nicht überraschend, dass die Werte für den Bereich Interesse niedriger sind als die der übrigen 10.Klassen, die sich für ein naturwissenschaftliches Gymnasium entschieden.

Die Mittelwerte der übrigen 10.Klassen lagen alle über denen der 11.Klassen. Der Kurs ist für die 10.Jahrgangsstufe ausgelegt. Die Anleitungen enthalten somit viele Lerninhalte, die den Lernenden der 11.Klassen bereits bekannt sind. Dies könnte ein Grund für die etwas niedrigeren Mittelwerte der 11.Klassen darstellen.





**Abbildung 70: KIM - Ergebnisse der 10.Klassen getrennt nach Bereichen (Die Mittelwerte für den Bereich Druck/ Anspannung wurden in dieser Graphik nicht wie in Kapitel 3 beschrieben umgerechnet)**

Die Auswertung der einzelnen Versuchsgruppen ergab, dass die Lernenden der 10.Klassen fast aller Versuchsgruppen etwas höhere Werte für intrinsische Motivation angaben als die der 11.Klassen. Nur die Ergebnisse der Schülerinnen und Schüler der 11.Klassen, die sich mit dem „Knaller-Experiment beschäftigten, lagen über denen der 10.Klassen. Auch verglichen mit den anderen Versuchsgruppen dieser Jahrgangsstufe, gaben die Lernenden der „Knaller-Experiment“-Gruppen die höchsten Werte für intrinsische Motivation an.

Mittelwerte: Wahrgenommene Kompetenz	V1	V2	V3	V4	V5
10.Klassen	3,06	2,31	2,91	2,33	2,33
11.Klassen	2,36	2,42	2,21	2,12	3,00

**Abbildung 71: Mittelwerte der Versuchsgruppen im Bereich wahrgenommene Kompetenz**

Vergleicht man die Werte der Jahrgangsstufen hinsichtlich dem Bereich wahrgenommener Kompetenz (s. Abbildung 71) so fällt auf, dass die Lernenden der 10.Klassen, die diesen Versuch wählten, deutlich niedrigere Werte angaben als die Lernenden der 11.Klassen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Versuch zum „Knaller-Experiment“ der anspruchsvollste Versuch des Kurses ist. Allerdings zeigt die Abbildung 55, dass die Lernenden dieser Versuchsgruppen nicht weniger intrinsisch motiviert waren. Die Werte in den Bereichen Interesse und Druck gleichen die niedrige Durchschnittspunktzahl in dem Bereich wahrgenommene Kompetenz aus.

Auffällig ist, dass die Ergebnisse der 11.Klässler, die sich mit dem „Knaller-Experiment“ beschäftigten verglichen mit den anderen Versuchsgruppen der Jahrgangsstufe am höchsten ausfallen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass das Experiment aufgrund seines Anspruchs für diese Jahrgangsstufe etwas besser geeignet ist. Darüber hinaus zeigt die Auswertung des Wissenstests, dass es sich bei den Lernenden dieser Versuchsgruppen um besonders leistungsstarke Schülerinnen und Schüler handelte. Daher kamen die Lernenden mit diesem Versuch besonders gut zurecht.

## **4.2 Die Diskussion des Wissenstests**

### **4.2.1 Die Diskussion der Multiple-Choice-Aufgaben**

Die Auswertung beider Jahrgangsstufen zeigte, dass sowohl die 10. als auch die 11.Klassen durchschnittlich ein gutes Ergebnis erzielten. Somit hat ein Großteil der Lernenden beider Jahrgangsstufen die Lernziele des Kurses erreicht. Dabei erzielte 11-2 mit 1,49 das beste Ergebnis. Dies könnte auf die gute Vorbereitung dieser Klasse zurückzuführen sein. Gemäß dem Lehrplan der 10.Klassen, kannten die Lernenden der 11.Klassen die Inhalte dieses Multiple-Choice-Teils bereits. Jedoch lagen die Inhalte für die 11.Klassen bereits ein Jahr zurück. Dies könnte erklären, warum die Klasse 11-1 im Vergleich etwas schlechter als zwei der 10.Klassen abschnitt. Durch die ausführliche Vorbereitungsphase wiederholten die Schülerinnen und Schüler aus 11-2 die Lerninhalte besser.

Vergleicht man die Ergebnisse der 10.Klassen, so fällt auf, dass die Klasse 10-3 am schlechtesten abschnitt. Wie bereits die Resultate dieser Klasse in der KIM, könnten auch diese Ergebnisse darauf zurückzuführen sein, dass es sich hierbei um die einzige der Klassen handelt, die kein naturwissenschaftliches Gymnasium besucht. Obwohl diese Klasse das schlechteste Resultat erzielte, lag ihre Durchschnittsnote immer noch über 2,5, was ein gutes Ergebnis darstellt.

### **4.2.2 Die Diskussion der ersten Aufgabe**

Die Leistungen der 10.Klassen bei dieser Aufgabe waren im Schnitt befriedigend mit einer Durchschnittsnote von 2,72. Die Auswertung zeigte, dass die Klassen 10-3 und 10-4 deutlich besser abschnitten, als 10-1 und 10-2. Interessanterweise schnitt die Klasse 10-3, die in dem Multiple-Choice- Aufgabenteil das durchschnittlich schlechteste Ergebnis erzielte, in dieser Aufgabe am besten ab.

Bei den Klassen 10-3 und 10-4 handelt es sich im Gegensatz zu 10-1 und 10-2 um reine Mädchenklassen. Decker, Ludwig und Kirschner beobachteten in ihrem Projekt zur Individualisierung des Mathematikunterrichts, dass Schülerinnen Aufgaben durchschnittlich sorgfältiger bearbeiten Schüler(Decker, Ludwig & Kirschner, 2007, S. 21f). Demnach könnte das bessere Ergebnis der beiden reinen Mädchenklassen darauf zurückzuführen, dass die Ausarbeitung der Mädchen im Schnitt gründlicher waren.

Das gute Ergebnis von Klasse 10-3 zeigt, dass die intrinsische Motivation nicht der einzige Faktor ist, der die Leistung der Lernenden beeinflusst. Die Lernenden dieser Klasse erzielten durchschnittlich bessere Ergebnisse als die der anderen Klassen, obwohl sie nach der KIM weniger intrinsisch motiviert waren. Da nur die intrinsische Motivation geprüft wurde, lassen sich die Ergebnisse nicht erklären.

Die Auswertung der verschiedenen Versuchsgruppen zeigte, dass die 11.Klassen in fast allen Versuchen bessere Ergebnisse erzielten. Nur die Gruppen, die sich mit dem Versuch zur optischen Pinzette (V3) beschäftigten schnitten verglichen mit den 10.Klassen etwas schlechter ab. Die Auswertung liefert keinen Grund, warum diese Versuchsgruppen der 10.Klassen besser abschnitten als die der 11. Jahrgangsstufe. In beiden Jahrgangsstufen erzielten die Lernenden, die sich mit diesem Versuch beschäftigten die schlechtesten Resultate. Ein Grund hierfür könnte sein, dass sich dieser Versuch aus zwei verschiedenen Aufbauten zusammensetzte und die Lernenden somit zwei Skizzen anfertigen mussten. Gerade beim zweiten Aufbau („Messung der Haardicke“) waren viele Skizzen unvollständig. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Lernenden dieser Gruppen für die Durchführung des ersten Teilversuches viel Zeit benötigten und sich so nur kurz mit dem zweiten Teilversuch beschäftigen konnten.

In beiden Jahrgangsstufen erlangten die Gruppen der Versuche zum Michelson-Interferometer (V1) und zum „Knaller-Experiment“ (V5) die besten Ergebnisse. Die guten Ergebnisse beider Gruppen, die sich mit dem Michelson-Interferometer beschäftigten, könnten darauf zurückzuführen sein, dass der Versuchsaufbau im Vergleich mit den anderen Experimenten weniger umfangreich ist. Zudem werden der Aufbau und die Funktionsweise während des Einführungsvortrags mit Hilfe einer Animation beschrieben.

Der Versuchsaufbau zum „Knaller-Experiment“ besteht im Wesentlichen ebenfalls aus einem Michelson-Interferometer. So könnten die guten Ergebnisse in diesem Experiment zum Teil ebenfalls auf dieselben Ursachen zurückgeführt werden.

Insgesamt ergab die Auswertung sowohl getrennt nach Klassen als auch nach Versuchsgruppen für beide Jahrgangsstufen durchschnittlich gute bis befriedigende Ergebnisse.

### 4.2.3 Die Diskussion der zweiten Aufgabe

Auch in der letzten Aufgabe des Wissenstest erzielten beide 11.Klassen durchschnittlich ein besseres Ergebnis als die einzelnen 10.Klassen. Auffällig war, dass die Ergebnisse aller Klassen bis auf 11-2 unter einer Punktzahl von 1,00 lagen, der Hälfte der zu erreichenden Punkte in dieser Aufgabe. Dies lässt vermuten, dass manche zentrale Aspekte der Versuche zum Teil nicht vollständig verstanden wurden. Die Lernenden waren größtenteils zwar in der Lage, die vorgegebene Begründung als falsch zu identifizieren, aber konnten keine richtige Begründung nennen. Die Ergebnisse von Klasse 11-2 könnten erneut auf ihre gute und längere Vorbereitungsphase zurückzuführen sein.

Die Auswertung der einzelnen Versuchsgruppen der 10.Klassen ergab, dass die Gruppen, die sich mit dem Michelson-Interferometer und dem Quantenradierer beschäftigen die besten Werte erzielten. Auffällig ist vor allem das Ergebnis der Quantenradierer-Gruppen, die als einzige eine höhere Durchschnittspunktzahl als 1,00 erreichten. Interessanterweise handelt es sich hierbei zudem um den einzigen Versuch, bei dem die Gruppen der 11.Klassen schlechter abschnitten als die 10.Klassen. Die Auswertung der Daten liefert hierfür keine Hinweise, die diesen Sachverhalt begründen könnten.

Das Ergebnis zum Michelson-Interferometer könnte erneut darüber erklärt werden, dass dessen Funktionsweise bereits im Einführungsvortrag besprochen wurde. Auch die Lernenden der 11.Klassen, die sich mit dem Michelson-Interferometer beschäftigten, schnitten besser als die anderen Versuchsgruppen bis auf eine ab. Sie erzielte ebenfalls eine Punktzahl über 1,00 Punkten.

Die Versuchsgruppen der 10.Klassen, die sich mit dem „Knaller-Experiment“ beschäftigten, schnitten dagegen neben den Quantenkryptographie-Gruppen am schlechtesten ab. Die schlechteren Ergebnisse der Lernenden, die das „Knaller-Experiment“ durchführten, könnten darauf zurückzuführen sein, dass dieser Versuch der schwierigste des Kurses ist. Die Auswertung zeigt, dass einige Lernenden dieser Jahrgangsstufe in der Lage waren, die Aufgabe korrekt zu beantworten. Jedoch war es im Vergleich mit den 11.Klassen ein deutlich geringerer Anteil.

Der Versuch zur Quantenkryptographie wurde nach dem „Knaller-Experiment“ als schwierigster Versuch des Kurses eingestuft. Dies könnte die schlechten Ergebnisse der 10. Klassen erklären. Betrachtet man die 11. Klassen so schnitten die Lernenden im

Vergleich zu den anderen Versuchsgruppen bei diesem Experiment am schlechtesten ab.

Interessanterweise zeigten die Resultate der 11.Klassen darüber hinaus, dass die Gruppen, die sich mit dem „Knaller-Experiment“ beschäftigten am besten abschnitten. Wie in Abbildung 68 zu sehen ist, liegen die Ergebnisse der 11.Klassen in diesem Versuch deutlich höher als die der 10.Klassen. Zudem erreichten die Lernenden, die sich mit diesem Versuch beschäftigten insgesamt mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 1,62 die höchste Punktzahl im Vergleich mit allen anderen Versuchsgruppen. Dieses Ergebnis könnte einerseits darauf zurückzuführen sein, dass die Klasse 11-2 einen großen Anteil der 11.Klassen (s. Abbildung 49) ausmacht. Die Ergebnisse könnte so auf die gute Vorbereitung zurückgeführt werden. Allerdings erzielten die anderen Versuchsgruppen vergleichsweise nicht über doppelt so hohe Punktzahlen wie die 10.Klassen und die Lernenden der Quantenradierer-Gruppen schnitten sogar schlechter ab. Demnach kann das Ergebnis der „Knaller-Experiment“-Gruppen der 11.Klasse nicht nur auf die gute Vorbereitung zurückgeführt werden.

Der Versuch zum „Knaller-Experiment“ ist auf die Übersichtsfolie (s. A1.2), die in der Vorbereitungsphase des Kurses gezeigt wird, als der schwierigste ausgeschrieben. Zudem wurden die Lehrkräfte in der Mail, mit der sie die Materialien für die Vorbereitungsphase erhielten, darauf hingewiesen, dass dieser Versuch speziell für Lernende geeignet ist, die im Fach Physik und im Umgang mit Experimenten keine Schwierigkeiten haben. Somit könnten die Ergebnisse dieser Versuchsgruppen darauf zurückgeführt werden, dass es sich bei den Lernenden um Schülerinnen und Schüler der Physikkurse handelten, die bessere Leistungen als der Klassendurchschnitt erzielten. Wertet man den Multiple-Choice-Aufgabenteil, der sich nur mit Fachwissen beschäftigte, allein für die Lernenden der 11.Klassen dieser Versuchsgruppen aus, so ergibt sich eine Durchschnittsnote von 1,42. Damit liegen diese Schülerinnen und Schüler nochmals über 0,2 Notenpunkte über dem bereits guten Mittelwert der 11.Klassen.

### 4.3 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse für den im Zuge dieser Arbeit entworfenen Kurs festhalten:

Erstens ist der Kurs umsetzbar. Die Durchführung des Kurses zeigte, dass es möglich ist einen Quantenphysikkurs für die 10. Jahrgangsstufe des bayrischen Gymnasiums in einem Schülerlabor durchzuführen, der in den Unterricht eingebettet ist. Die Lernenden führten ihre ausgewählten Versuche in der gegebenen Zeit durch und hielten in der Nachbereitungsphase Präsentationen über die Durchführung. Die Rückmeldung der Lehrkräfte über diese Präsentationen war größtenteils sehr positiv. Darüber hinaus konnten die Lernenden selbst an Experimenten arbeiten und Phänomene der Quantenphysik, die auch über den Lehrplan der 10. Jahrgangsstufe hinausgehen, selbst beobachten. Die Möglichkeit selbst zu experimentieren steigert die Motivation und durch die praktische Erfahrung, die die Lernenden im Schülerlabor erhalten, werden naturwissenschaftliche Arbeitsweisen gefördert. Gerade Experimente der Quantenphysik sind oftmals sehr weit vom Alltag entfernt, was den praktischen Zugang, den die Lernenden durch das PhotonLab erhalten, umso wertvoller macht.

Des Weiteren zeigte die Auswertung des Testverfahrens, dass der Kurs für die Lernenden gewinnbringend ist. Die Schülerinnen und Schüler erreichten im Schnitt gute bis befriedigende Leistungen in den Bereichen des Wissenstest. Die Auswertung des Multiple-Choice-Aufgabenteils ergab, dass die Lernenden die Lernziele in diesem Bereich zum Großteil erreicht hatten. Die erste der Aufgaben mit freier Antwort zeigte, dass die Schülerinnen und Schüler nach Abschluss der Experimentierphase größtenteils in der Lage gewesen sind gute bis befriedigende Skizzen ihres Versuchsaufbaus anzufertigen. Dass das „Knaller-Experiment“ für Lernende der 10. Jahrgangsstufe schwierig ist, ist aus der Auswertung der zweiten Aufgabe ersichtlich, da die 10.Klassen hierbei deutlich schlechter abschnitten als die Lernenden der 11.Klasse. Doch auch einige der Schülerinnen und Schüler der 10.Klasse erreichten das Lernziel dieser Aufgabe. Selbst wenn die Schülerinnen und Schüler ihr Experiment nicht zur Gänze erläutern konnten, haben sie dennoch einen Einblick in Welt der Quantenphysik erhalten. Ein Großteil der Lernenden hat die Lernziele zu grundlegenden lehrplanrelevanten Aspekten wie beispielsweise dem Doppelspaltexperiment, der Polarisation von Licht und dem Michelson-Interferometer erreicht.

Insgesamt schnitten die 11.Klassen im Wissenstest besser ab als die 10. Jahrgangsstufe. Dies war zu erwarten. Die Lernenden sind durchschnittlich ein Jahr älter und es handelt sich zudem um Lernende, die sich gezielt dafür entschieden haben, Physik in der Oberstufe weiter zu belegen. Die Unterschiede zwischen Testergebnissen der 10. und 11. Klassen zeigen jedoch, dass der Wissenstest relevante Lernziele prüft. Andernfalls hätten die 11. Klassen nicht besser abgeschnitten.

Die Auswertungen der beiden 11.Klassen verdeutlicht zudem, welche Auswirkung unterschiedliche gute Vorbereitung auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler hat. Die Klasse 11-2, die sich sehr ausführlich auf die Experimentierphase im PhotonLab vorbereiteten, erzielte in allen Bereichen des Wissenstest bessere Ergebnisse.

Des Weiteren zeigte die Auswertung der KIM, dass die Lernenden im entworfenen Quantenphysikkurs intrinsisch motiviert waren. Obwohl einige der Lerninhalte über den Lehrplan der 10.Jahrgangsstufe hinausgehen, gaben die Lernenden Werte an, die über dem Durchschnitt der Skala lagen.

Allgemein spiegelt die Arbeit den großen Wert eines in den Unterricht eingebetteten Schülerlaborbesuches wieder. Die Lernenden sind intrinsisch motiviert und die Auswertung des Wissenstest zeigt einen Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler. Darüber hinaus eröffnet der entworfene Quantenphysikkurs für die Lernenden die Möglichkeit selbstständig mit Versuchen zu experimentieren, die ihnen in der Schule nicht zugänglich gewesen wären.



## 4.4 Ausblick

Aufgrund der positiven Ergebnisse der Tests könnte der entworfene Quantenphysikkurs am PhotonLab fortgesetzt werden. Allerdings sollte bei einer Fortsetzung auf folgende Punkte Rücksicht genommen werden:

Besonders die ersten Durchläufe haben gezeigt, wie wichtig eine gute Einbettung in den Unterricht ist. Eine gute Kommunikation zwischen Schülerlabor und Schule ist daher essentiell. Hierbei müssen der Aufbau des Kurses und die Aufgaben der Lehrkräfte in der Vorbereitungsphase besprochen werden.

Lehrkräfte, die an dem Kurs mit Klassen eines nicht naturwissenschaftlichen Gymnasiums teilnehmen wollen, könnten die Vorbereitungsphase auf zwei Unterrichtsstunden ausdehnen. Die Ergebnisse der einzigen Klasse, die von einem nicht naturwissenschaftlichen Gymnasium kam, fielen im Allgemeinen etwas schlechter aus als die Resultate der übrigen Lernenden. Eine längere Vorbereitungsphase könnte den Lernenden solcher Klassen helfen, sich besser auf die Experimente vorzubereiten.

Darüber hinaus könnte der Versuch zur optischen Pinzette um den zweiten Teilversuch gekürzt werden. So hätten die Lernenden mehr Zeit sich ausführlich mit Versuchsaufbau und der Funktionsweise dieses Experiments zu beschäftigen und geraten nicht in Zeitdruck.

Der Kurs wird aufgrund seiner Thematik immer anspruchsvoll für die 10. Klasse Gymnasium sein. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass dies für Klassen dieser Jahrgangsstufe kein Grund sein sollte, nicht an dem Kurs teilzunehmen, da ein Großteil der Schülerinnen und Schüler die Lernziele erreicht haben und zudem intrinsisch motiviert waren. Selbst die Lernziele zu sehr anspruchsvollen Versuchen wurden von einigen der Lernenden erreicht. Für Lernende der 10. Jahrgangsstufe ist das eine hervorragende Leistung.

Die Arbeit hat gezeigt, dass der Quantenphysikkurs gewinnbringend für die Lernenden ist. Das Konzept eines Schülerlabors ist geeignet, die besprochenen Lerninhalte der Quantenphysik zu vermitteln. Ausschlaggebend hierfür ist die Einbettung des Schülerlaborbesuchs in den Unterricht. Damit sollte der entworfene Quantenphysikkurs auch in Zukunft fortgesetzt werden.

## 5 Literaturangaben

- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., & Chu, S. (1985). Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*, 11(5), 288–290.
- Bennett, C. H., & Brassard, G. (2014). Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Theor. Comput. Sci.*, 560(P1), 7-11.
- Decker, S., Ludwig, R., & Kirschner, G. (2007). Geschlechtssensibler und geschlechtergerechter Mathematikunterricht durch Individualisierung.
- Demtröder, W. (Ed.). (2013). *Experimentalphysik: Vol. 2. Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik* (6<sup>a</sup> ed.). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Ekert, A. (1991). Quantum Cryptographie based on Bell's Theorem. *Physical Review Letters*, 67(6), 661–663.
- Gobrecht, H., Gobrecht, J. H., & Gobrecht, K. H. (1987). Bergmann-Schaefer–Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III: Optik.
- Gottlieb, M. A., & Pfeiffer, R. (2013). The Feynman Lectures on Physics: Volume III. Verfügbar unter [http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III\\_01.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html) (18.04.2018).
- Guderian, P. (2006). *Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte. Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik* (Dissertation). Humboldt-Universität, Berlin.
- Hecht, E. (2002). *Optics* (4th ed.). San Francisco: Addison Wesley.
- Heckhausen, J., & Heckhausen, H. (2010). *Motivation und Handeln* (4., überarbeitet und erweiterte Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Herzog, T. J., Kwiat, P. G., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1995). Complementarity and the quantum eraser. *Physical Review Letters*, 75(17), 3034-3037.
- Homeister, M. (2015). *Quantum Computing verstehen: Grundlagen-Anwendungen-Perspektiven*. Springer-Verlag.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (Eds.). (Ed.). (2015). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kwiat, P., Weinfurter, H. & Zeilinger, A. (1997). Wechselwirkungsfreie Quantenmessung. *Spektrum der Wissenschaft*. (1), 42-49.

- Müller, R., & Wiesner, H. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. *Physik in der Schule*, 38(2).
- Pawek, C. (2009). *Schülerlabore als interessesfördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe* (Dissertation). Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Schorn, B., & Wiesner, H. (2008). Die Quantenphysik in der Sekundarstufe. *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule*, 57 (6), 26-33.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB). (2004a). Lehrplan für das Gymnasium in Bayern: 10 Physik. Verfügbar unter <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26439> (1.05.2018)
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB). (2004b). Lehrplan für das Gymnasium in Bayern: 12.2 Ein Atommodell für die Quantenphysik. Verfügbar unter <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27574> (1.05.2018)
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB). (2004c). Lehrplan für das Gymnasium in Bayern: 7 Natur und Technik. Verfügbar unter <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26436> (1.05.2018)
- Streller, M. (2015). *The educational effects of pre and post-work in out-of-school laboratories* (Dissertation). Technische Universität, Dresden.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (Ed.). (2015). *Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure*: Springer Verlag.
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A., & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15, 31-45.

## 6 Anhang

A1: Materialien für die Vorbereitungsphase

A1.1: Übersicht zum Ablauf des Quantenphysikkurses

Ablauf des Quantenphysikkurses:

### 1. Vorbereitungsphase im Unterricht

- Kurzes Experiment zum Doppelspaltversuch (optional)
- Video Dr. Quantum
- Übersichtfolie
  - Schülerinnen und Schüler teilen sich in gleich große Gruppen auf
  - Jede Gruppe entscheidet sich für eines der Experimente

**Hinweis:** Das Knaller Experiment ist der anspruchsvollste der Versuche und sollte daher an Schülerinnen und Schüler verwiesen werden, die schon viel Grundwissen und Kompetenzen im Fach Physik mitbringen.

- Schülerinnen und Schüler arbeiten das Material zu ihrem Versuch gemeinsam in ihren Gruppen durch

Es ist sehr wichtig, dass die Lernenden bereits gut vorbereitet in den Kurs kommen. Da die Schülerinnen und Schüler im PhotonLab nähere Informationen zu Versuchsdurchführung und Auswertung erhalten, reicht die Zeit im Schülerlabor nicht aus, um die Materialien, die sie zuvor erhalten haben, zum ersten Mal durchzulesen.

### 2. Experimentierphase im PhotonLab

- Einführungsvortrag von Frau Dr. Stähler-Schöpf
- Kurze Laborführung
- Experimentieren im PhotonLab an den gewählten Versuchen
- Evaluation (ca. 20-30 min)

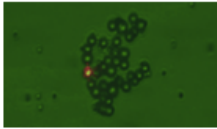
### 3. Nachbereitungsphase im Unterricht

- Die Lernenden stellen in kurzen Präsentationen ihren Versuch dem Rest der Klasse vor
- Die Präsentationen sollten den Versuchsaufbau, die Durchführung und wichtige Ergebnisse enthalten

## A.1.2: Übersichtsfolie

### Versuche im PhotonLab

#### Optische Pinzette



In diesem Versuch können wir Teilchen, die nur wenige Mikrometer groß sind, festhalten und verschieben.

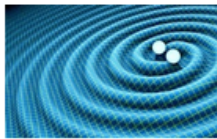
Im zweiten Teilversuch könnt ihr bestimmen wie dick eines eurer Haare ist.

Schwierigkeitsgrad:



1

#### Michelson Interferometer



Was sind Gravitationswellen und wie konnten sie nachgewiesen werden?

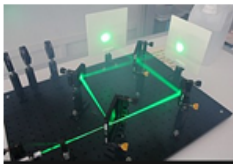
Wie können wir die Wellenlänge eines Lasers bestimmen?

Das alles erfahrt ihr bei diesem Versuch.



2

#### Quantenradierer

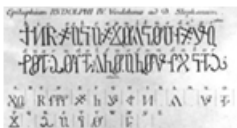


Im Doppelspaltversuch zeigt Licht Welleneigenschaften. Es kann sich aber auch wie ein Teilchen verhalten. Wann es welche Eigenschaft zeigt, könnt ihr in diesem Versuch beobachten.



3

#### Quantenkryptographie



In diesem Experiment versendet ihr verschlüsselte Nachrichten, entschlüsselt diese und könnt einen Lauscher in der Leitung entdecken.



4

#### Knaller Experiment

Folgendes Gedankenexperiment wird mit einem Versuch überprüft:



Wir haben Bomben und Blindgänger, die äußerlich nicht unterscheidbar sind. Wie können wir entscheiden welches die scharfen Bomben sind, ohne alle hochzujagen?



5

Abbildung 72: Übersichtsfolie für die Vorbereitungsphase

## A2: Testverfahren

## A2.1: Kurzsкала zur intrinsischen Motivation (Wilde, 2009, S.45)

## KIM:

Wie sehr treffen die folgenden Aussagen auf den Quantenphysikkurs im PhotonLab für dich zu?

*0 = gar nicht, 1 = kaum, 2 = mittelmäßig, 3 = ziemlich, 4 = außerordentlich*

Aussage	0	1	2	3	4
1. Das Experimentieren im PhotonLab hat mir Spaß gemacht.					
2. Ich fand das Experimentieren im PhotonLab sehr interessant.					
3. Das Experimentieren im PhotonLab war unterhaltsam.					
4. Mit meiner Leistung im PhotonLab bin ich zufrieden.					
5. Beim Experimentieren im PhotonLab stellte ich mich geschickt an.					
6. Ich glaube, ich war beim Experimentieren im PhotonLab ziemlich gut.					
7. Beim Experimentieren im PhotonLab fühlte ich mich unter Druck.					
8. Beim Experimentieren im PhotonLab fühlte ich mich angespannt.					
9. Ich hatte Bedenken, ob ich das Experimentieren im PhotonLab gut hinbekomme.					

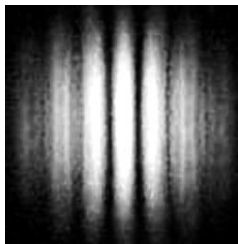
## A2.2: Der Kompetenztest

Der folgende Fragebogen soll bei der Auswertung und Weiterentwicklung des Quantenphysikkurses im PhotonLab helfen. Bitte fülle ihn sorgfältig und gewissenhaft aus.

Bei den Ankreuzaufgaben können mehrere Antworten richtig sein. Kreuze alle Antworten an, die du für richtig hältst!

- 1) Kreuze an welche Aussage(n) für den Welle-Teilchen-Dualismus von Licht zutrifft/zutreffen:
  - a. Licht zeigt in 50% aller Versuchsdurchläufe Teilcheneigenschaften und in den anderen Versuchsdurchläufen Welleneigenschaften.
  - b. Licht zeigt in manchen Versuchen Wellen- und in anderen Teilcheneigenschaften.
  - c. Welche Eigenschaften Licht zeigt hängt vom Versuch ab.
  - d. Welche Eigenschaften Licht zeigt ist unabhängig vom Versuch.

- 2) Du führst im PhotonLab einen Versuch mit Laserlicht durch und kannst auf einem Schirm folgendes Muster beobachten:



Was kannst du nun mit Sicherheit über den Versuch sagen:

- a. Licht zeigt im Versuch nie Welleneigenschaften
  - b. Licht zeigt im Versuch Welleneigenschaften
  - c. Das Muster entsteht durch die Überlagerung von 2 oder mehr Lichtwellen
  - d. Das Muster entsteht durch Photonen, die miteinander stoßen und voneinander abprallen
  - e. Das Muster nennt man Interferenzmuster
  
- 3) Welche Aussage(n) trifft/treffen für das Doppelspaltexperiment zu:
  - a. Sind beide Spalte geöffnet können wir ein Interferenzmuster beobachten.
  - b. Verschließen wir einen der Spalte ändert sich nichts
  - c. Verschließen wir einen der Spalte verschwindet das Interferenzmuster
  - d. Die Aussagen b. und c. hängen davon ab welcher Spalt verschlossen wird

- 4) Kreuze die Aussage(n) an, die man als Ergebnisse des Doppelspaltexperiments erhält:
- a. Licht zeigt Teilcheneigenschaften
  - b. Licht zeigt Welleneigenschaften
  - c. Nur Laserlicht zeigt Welleneigenschaften
  - d. Nur Laserlicht zeigt Teilcheneigenschaften
  - e. Keine der obigen Aussagen sind Ergebnisse des Doppelspaltexperiments
- 5) Im PhotonLab hast du dich ausführlich mit einem Versuch beschäftigt. Fertige eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus des Versuches an.

**Hinweis:** Die Skizzen müssen nur die Bestandteile enthalten, die für deinen Versuch wichtig sind. (Du musst beispielsweise kein Mikroskop in aller Einzelheit zeichnen, falls das zu deinem Versuchsaufbau gehört. Falls du den Versuch Quantenkryptographie durchgeführt hast, reicht es nur eine Hälfte (Alice und Bob) des Versuchsaufbaus zu skizzieren.) **Zeichne einen möglichen Strahlengang des Laserlichts ein.**



- 6) Die folgende Tabelle enthält Beobachtungen zu allen Experimenten. Gib an, ob die Begründung, die für die Beobachtung zu deinem Experiment angegeben ist, korrekt ist. Falls die Aussage falsch ist, ergänze deine Bewertung um die richtige Begründung (unten). **Bewerte nur die Begründung zu deinem Experiment!!**

Versuch	Beobachtung	Begründung	Richtig/Falsch
Quantenradierer	In einem Interferometer verschwindet das Interferenzmuster auf dem Schirm, wenn wir einen Polarisator ( $90^\circ$ ) in einen der Interferometerarme stellen.	Das Interferenzmuster verschwindet, da der Polarisator den Interferometerarm blockiert und somit kein Licht diesen Arm durchlaufen kann.	
Michelson-Interferometer	Drehen wir im Michelson-Interferometer an der Mikrometerschraube, verändert sich das Interferenzmuster auf dem Schirm.	Das Interferenzmuster verändert sich, da das Licht vom Strahlteiler in einem anderen Verhältnis aufgespalten wird.	
Quantenkryptographie	Drehen wir den Polarisationsdreher von Alice auf $45^\circ$ und den von Bob auf $0^\circ$ erhalten wir zufällig eine 0 oder 1.	Das Ergebnis ist zufällig, da das um $45^\circ$ polarisierte Licht den $0^\circ$ Polarisationsdreher nicht passieren kann.	
Optische Pinzette	Wir können nur wenige Mikrometer große Teilchen mit Hilfe eines fokussierten Lasers festhalten und verschieben.	Das ist möglich, da der Laserfokus ein kleines Loch in unsere Probe brennt und das Teilchen dort hineinfällt.	
Knaller Experiment	Markieren wir einen der Interferometerarme, so misst unser Photodetektor ein stärkeres Signal, als wenn wir beide Arme frei lassen.	Das Signal ist stärker, da das Licht nun nur den nicht markierten Weg nimmt.	

Deine Begründung (falls die obige Begründung falsch ist):

---

---

---

---

Hattest du vor dem Besuch Vorwissen zur Quantenphysik? Wenn ja woher?

---

---

A3: Erwartungshorizont für die Aufgabe mit freier Antwort:

A3.1: Erwartungshorizont der ersten Aufgabe

Michelson Inteferometer:

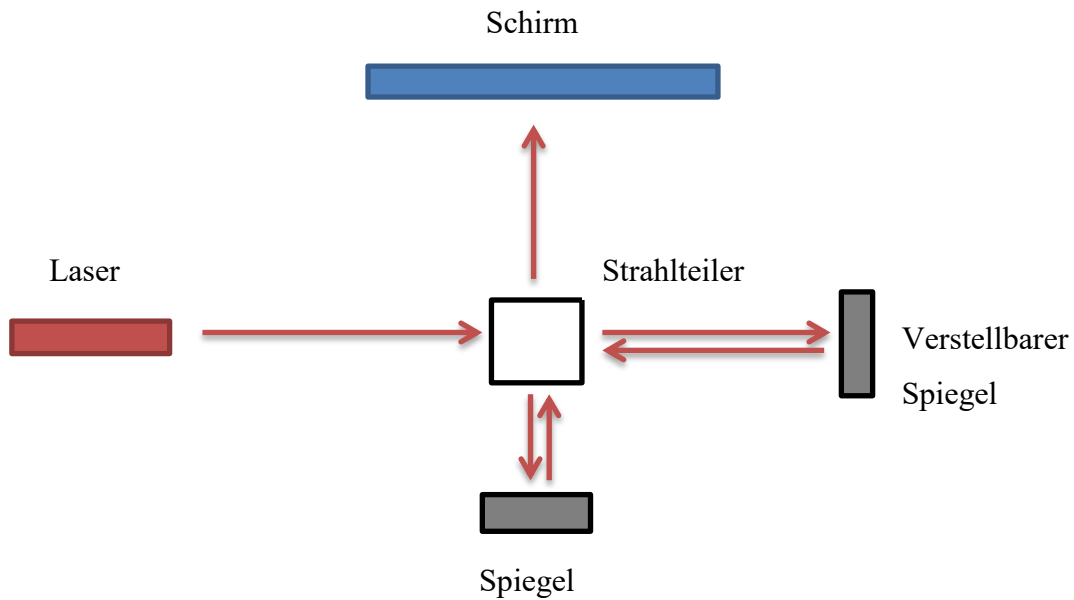


Abbildung 73: Versuchsaufbau des Michelson-Interferometers

Optische Pinzette- Versuch 1:

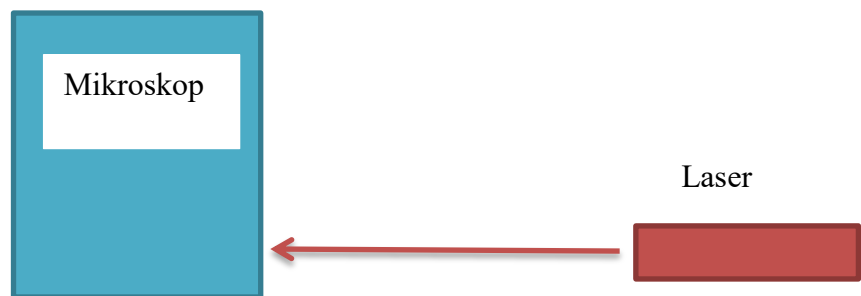


Abbildung 74: Versuchsaufbau der optischen Pinzette

Versuch 2 (Draufsicht):

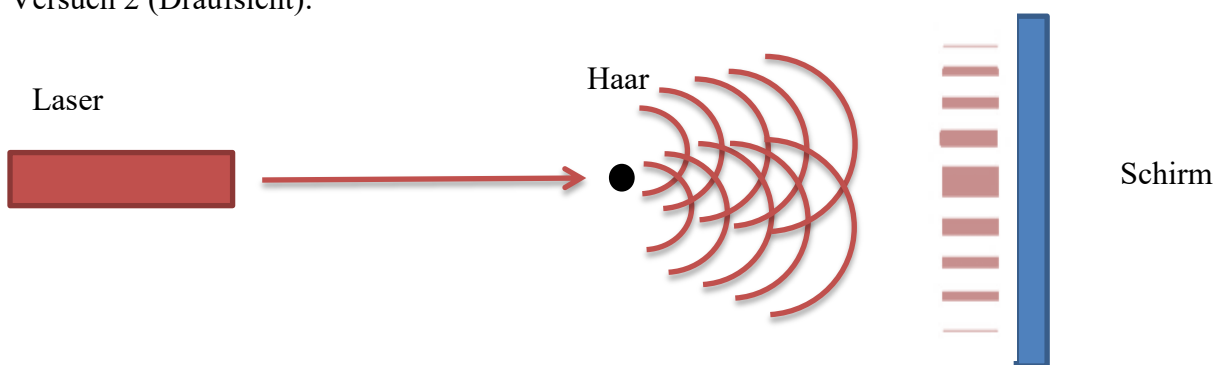


Abbildung 75: Versuchsaufbau des zweiten Teilversuchs der optischen Pinzette

## Quantenradierer:

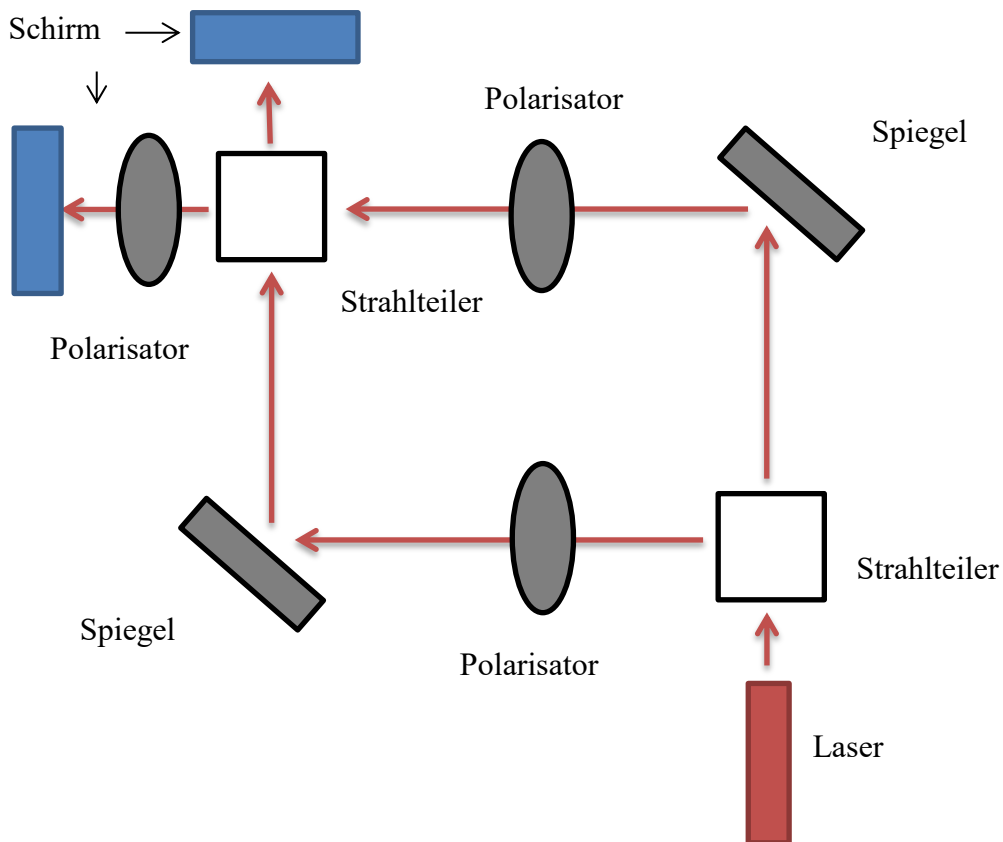


Abbildung 76: Versuchsaufbau des Quantenradierers

## Quantenkryptographie:

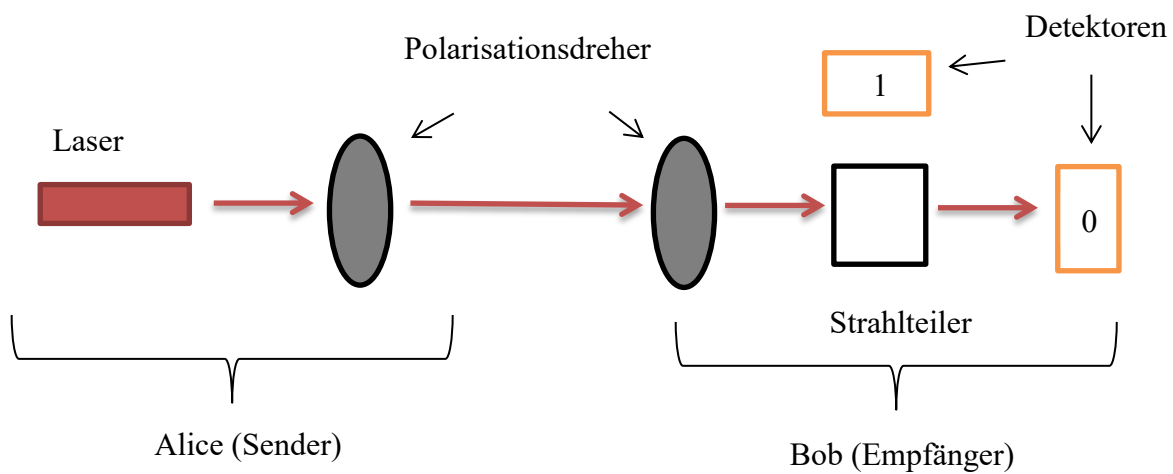


Abbildung 77: Versuchsaufbau der Quantenkryptographie

Knaller-Experiment:

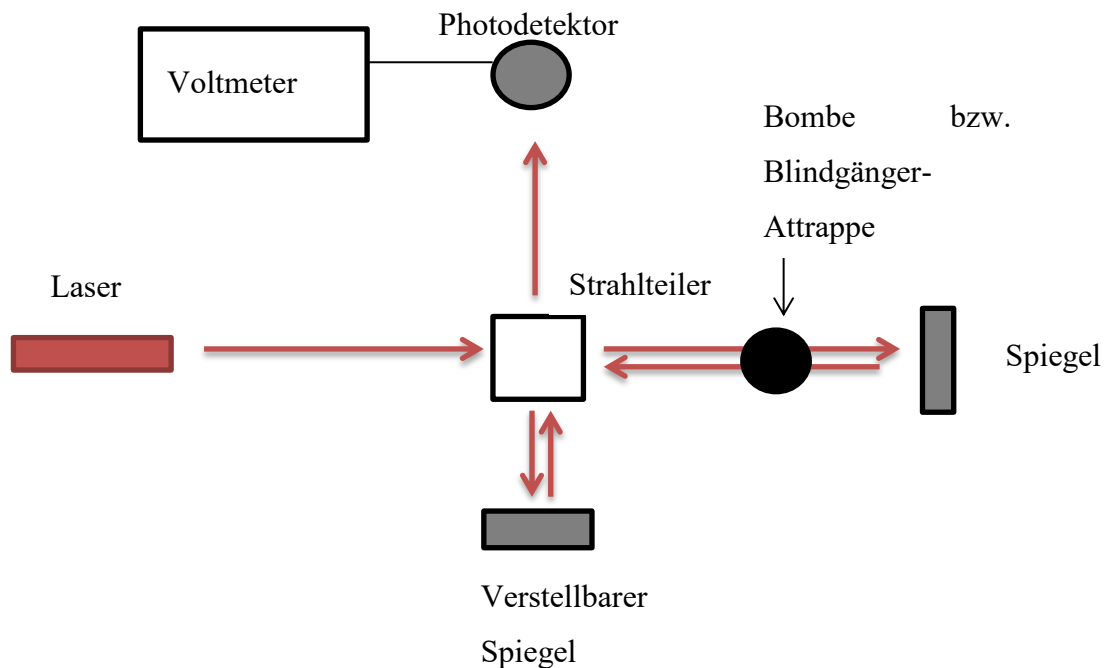


Abbildung 78: Versuchsaufbau des Knaller-Experiments

A3.2: Erwartungshorizont der zweiten Aufgabe

Quantenradierer:

Die Aussage ist falsch. Durch den Polarisationsfilter sind die Wege im Interferometer unterscheidbar. Die Möglichkeit eine Welcher-Weg-Information zu erhalten zerstört die Interferenz.

Michelson-Interferometer:

Die Aussage ist falsch. Durch das Drehen der Mikrometerschraube wird der Abstand zwischen einem der Spiegel und dem Strahlteiler verändert. Die Welle, die diesen Weg nimmt, wird so gegen die andere verschoben. Dadurch verändert sich die Position der Minima und Maxima des Interferenzmusters.

Quantenkryptographie:

Die Aussage ist falsch. Man erhält ein zufälliges Ergebnis, da Alice in einer anderen Basis versendet als Bob empfängt. Dadurch ist das Licht um  $45^\circ$  oder  $-45^\circ$  polarisiert, wenn es am Strahlteiler ankommt. Der Strahlteiler ordnet nur  $0^\circ$  und  $90^\circ$  polarisiertes Licht eindeutig einem der Sensoren zu.

Optische Pinzette:

Die Aussage ist falsch. Das Licht des Lasers wird an dem Teilchen gebrochen. Durch die Brechung wirkt eine Kraft auf das Teilchen in Richtung des Laserfokus.

„Knaller-Experiment“:

Die Aussage ist falsch. Das Signal ist stärker, da durch das Markieren eines Weges eine Welcher-Weg-Information erhalten werden könnte. Dadurch wird die Interferenz zerstört. Man misst nun nicht mehr das Minimum des Interferenzmusters.

A4: Video: Motivation Michelson-Interferometer (Gravitationswellen)

[https://www.youtube.com/watch?v=mtCAmb\\_Mg1k](https://www.youtube.com/watch?v=mtCAmb_Mg1k)

## A5: Überblick über die Versuche im PhotonLab

Lasersicherheit	Quantenradierer *
Polarimeter	Musikübertragung
Haardicke bestimmen	3D Scanner
Abstandsmessung	Spektralanalyse
Wasser als Lichtleiter	Laserspeckels
Laserzielschießen	Optische Pinzette *
Fata Morgana	Spektrometer bauen
Michelson Interferometer *	Quantenkryptographie *
Bestimmung der Zuckerkonzentration in Cola	Musikübertragung mit dem Faraday Effekt
3D Sehen	Holographie
Zauberspiegel Miraskop	Geheimbildschirm
Schlierenoptik	Knaller-Experiment *

Abbildung 79: Überblick über die Versuche im PhotonLab (\*: Versuch ist Teil des entworfenen Quantenphysikkurses)



## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Interferenzmuster zweier kreisförmiger Wellen (links), Streifenmuster (rechts) (Schorn et al., 2008, S.26) .....	10
Abbildung 2: Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen (links) und Elektronen (rechts) (Schorn et al., 2008, S. 29) .....	11
Abbildung 3: Ergebnisse des „Ersten Elektronen-Skilauf“ (links) und „Zweiten Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ (rechts) (Schorn et al., 2008, S. 30f) .....	12
Abbildung 4: Wasserwellen am Doppelspalt (Gottlieb, 2013) .....	15
Abbildung 5: Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen (Patronenkugeln). (a) zeigt den Versuchsaufbau, (b) die Einzelspaltverteilungen, (c) die gesamte Verteilung (Gottlieb, 2013) .....	16
Abbildung 6: Elektrischer und magnetischer Anteil einer elektromagnetischen Welle (Tipler et al., 2015, S. 988).....	17
Abbildung 7 Lineare Polarisierung von Wellen (Gobrecht, 1987, S. 178) .....	20
Abbildung 8: Linear polarisierte Welle (Gobrecht, 1987, S.179) .....	20
Abbildung 9: Interferenz von 2 Wellen (Bergmann-Schäfer, 1987, S.211).....	21
Abbildung 10: Versuchsaufbau – Michelson-Interferometer, M1 und M2: Spiegel, ST: Strahlteiler (Demtröder, 2013, S.306) .....	22
Abbildung 11: Doppelspaltexperiment mit Licht (Tipler et al., 2015, S.1091) .....	24
Abbildung 12: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch (Hecht, 2002, S.395) .....	24
Abbildung 13: Doppelspaltexperiment (Tipler et al., 2015, S.1091) .....	25
Abbildung 14: Versuchsaufbau zum Hallwachs-Effekt (Wiesner et al., 2000, S. 7) .....	26
Abbildung 15: Versuchsaufbau zum photoelektrischen Effekt (Tipler et al., 2015, S.1162) ..	28
Abbildung 16: Versuchsaufbau des Mach-Zehnder-Interferometers (Wiesner et al., 2000, S. 24).....	30
Abbildung 17: Doppelspaltexperiment mit Elektronen ( <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_de.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_de.svg</a> ).....	34
Abbildung 18: Versuchsaufbau – Quantenradierer (Herzog, 1995, S.3034).....	36
Abbildung 19: Versuchsaufbau – (b) Messung mit Polarisationsfolie, um Information zu erhalten. (c) Messungen im 45° Winkel, um Information über „idler“ Photon zu löschen. (Herzog, 1995, S.3035) .....	37
Abbildung 20: Hütchenspiel (Kwiat, 1997, S.42) .....	38
Abbildung 21: Versuchsaufbau des Mach-Zehnder-Interferometers (Wiesner et al., 2000, S. 24).....	40

Abbildung 22: Überblick .....	43
Abbildung 23: Kräfte auf ein etwa 10 Mikrometer großes Teilchen in einer optischen Falle (Ashkin et al., 1985, S. 289) .....	44
Abbildung 24: Binärdarstellung des Alphabets (Thorlabs. (2017). Quantenkryptografie - Analogieversuch: Handbuch. Verfügbar unter <a href="https://www.thorlabs.com/drawings/6019ae92e410f318-729EA5F9-D34E-5427-AF37D4A532EC338B/EDU-QCRY1_M-GermanManual.pdf">https://www.thorlabs.com/drawings/6019ae92e410f318-729EA5F9-D34E-5427-AF37D4A532EC338B/EDU-QCRY1_M-GermanManual.pdf</a> , S. 45) .....	46
Abbildung 25: Beispiel für eine Verschlüsselung durch das One-Time Pad (Thorlabs, 2017, S. 10) .....	46
Abbildung 26: Übersicht über verschiedene Fälle (Thorlabs, 2017, S. 14).....	49
Abbildung 27: Schülerinnen und Schüler beim Experimentieren im PhotonLab.....	50
Abbildung 28 : Überblick über den Ablauf des Besuches für große Klassen.....	51
Abbildung 29: Licht als elektromagnetische Welle mit Wellenlänge $\lambda$ , elektrischen Feld $E(z)$ und magnetischen Feld $B(z)$ . .....	56
Abbildung 30: Animation zum Michelson-Interferometer .....	56
Abbildung 31: Überblicksmodell zu Determinanten motivierenden Handelns mit ergebnis- und folgebezogenen Erwartungen (Heckhausen, 2010, S.5) .....	61
Abbildung 32: Ausschnitt aus den Folien der Anleitung zum Michelson-interferometer .....	64
Abbildung 33: Versuchsaufbau – Michelson-Interferometer .....	65
Abbildung 34: Wellenlänge bestimmen – Michelson-Interferometer .....	65
Abbildung 35: Motivation - optische Pinzette .....	66
Abbildung 36: Ausschnitte aus den Anleitungen der optischen Pinzette: Impulsübertrag und Vektoraddition .....	67
Abbildung 37: Brechungsindex – optische Pinzette .....	68
Abbildung 38: Bestimmung der Haardicke .....	69
Abbildung 39: Versuchsaufbau – Quantenradierer.....	69
Abbildung 40: Doppelspaltexperiment mit Elektronen - Quantenradierer.....	71
Abbildung 41: Ausschnitt aus der Anleitung des Quantenradierers – Komplementaritätsprinzip und Erhalt der Weginformation .....	71
Abbildung 42: Versuchsaufbau – Quantenkryptographie ( Alice: Sendereinheit, Bob: Empfängereinheit).....	72
Abbildung 43: Basen, in denen Bits gesendet werden können - Quantenkryptographie.....	72
Abbildung 44: Polarisierung von Licht - Quantenkryptographie.....	73

Abbildung 45: Die Attrappen für die scharfe Bombe (links) und den Blindgänger (rechts). Die Attrappe für den Blindgänger enthält ein Loch, sodass der Laserstrahl den Blindgänger ungehindert passieren kann. ....	75
Abbildung 46: Übersicht – Knaller Experiment.....	76
Abbildung 47: Multiple-Choice-Aufgaben mit Lösung .....	80
Abbildung 48: Erste Aufgabe mit freier Antwort im Wissenstest .....	81
Abbildung 49: Zweite Aufgabe mit freier Antwort des Wissenstests.....	82
Abbildung 50: Übersicht über die Schulklassen.....	84
Abbildung 51: Auswertung des Multiple-Choice Aufgabenteils – Aufteilung der Gruppen...	87
Abbildung 52: KIM – Ergebnisse der 10.Klassen.....	89
Abbildung 53: KIM - Ergebnisse der 11.Klassen .....	89
Abbildung 54 : KIM - Ergebnisse nach Klassen .....	90
Abbildung 55: KIM - Ergebnisse nach Versuchsgruppen.....	90
Abbildung 56: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse der 10.Klassen.....	92
Abbildung 57: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse der 11.Klassen.....	93
Abbildung 58: Multiple-Choice-Aufgaben - Ergebnisse getrennt nach Klassen .....	93
Abbildung 59: Beispiel einer ungenügenden Versuchsskizze.....	94
Abbildung 60: Beispiel für eine ausreichende Versuchsskizze.....	94
Abbildung 61: Beispiel für eine sehr gute Versuchsskizze .....	95
Abbildung 62: 1. Aufgabe - Ergebnisse der 10.Klassen .....	95
Abbildung 63: 1.Aufgabe - Ergebnisse der 11.Klassen .....	96
Abbildung 64: 1. Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Klassen .....	96
Abbildung 65: 1. Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Versuchsgruppen .	97
Abbildung 66: 2.Aufgabe - Ergebnisse der 10.Klassen .....	97
Abbildung 67: 2.Aufgabe - Ergebnisse der 11.Klassen .....	98
Abbildung 68: 2.Aufgabe – Mittelwerte und Standardabweichungen der Klassen .....	98
Abbildung 69: 2. Aufgabe - Mittelwerte der einzelnen Versuchsgruppen getrennt nach Klassen .....	99
Abbildung 70: KIM - Ergebnisse der 10.Klassen getrennt nach Bereichen (Die Mittelwerte für den Bereich Druck/ Anspannung wurden in dieser Graphik nicht wie in Kapitel 3 beschrieben umgerechnet) .....	101
Abbildung 71: Mittelwerte der Versuchsgruppen im Bereich wahrgenommene Kompetenz	101
Abbildung 72: Übersichtsfolie für die Vorbereitungsphase .....	113
Abbildung 73: Versuchsaufbau des Michelson-Interferometers .....	119

Abbildung 74: Versuchsaufbau der optischen Pinzette .....	119
Abbildung 75: Versuchsaufbau des zweiten Teilversuchs der optischen Pinzette .....	119
Abbildung 76: Versuchsaufbau des Quantenradierers.....	120
Abbildung 77: Versuchsaufbau der Quantenkryptographie.....	120
Abbildung 78: Versuchsaufbau des Knaller-Experiments.....	121
Abbildung 79: Überblick über die Versuche im PhotonLab (*: Versuch ist Teil des entworfenen Quantenphysikkurses).....	124

## **Erklärung zur Hausarbeit gemäß §29 (Abs. 6) LPO I**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Hausarbeit von mir selbstständig verfasst wurde und dass keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt wurden. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, wurden von mir in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt ebenso für die in der Arbeit enthaltene Graphiken, Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift