

Polarisation von Licht im Physikunterricht

**Ein Elementarisierungsansatz zur Einführung in
quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien**

Dissertationsschrift
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
vorgelegt beim Fachbereich Physik
der Universität Kassel

von
Karen Rieck
aus Wilster

März 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Fachdidaktischer Hintergrund.....	4
2.1	Übergreifende Aspekte.....	4
2.1.1	Anschaulichkeit und Abstraktheit	5
2.1.2	Modellbildung	6
2.2	Die drei Stufen des Unterrichtskonzeptes	7
2.2.1	Erste Stufe	8
2.2.2	Zweite Stufe	10
2.2.3	Dritte Stufe	11
2.3	Schülervorstellungen	13
3	Fachlicher Hintergrund	15
3.1	Fachlicher Hintergrund zur Polarisation von Licht.....	16
3.1.1	Beschreibung von linear polarisiertem Licht	16
3.1.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht.....	18
3.1.3	Interferenz von polarisiertem Licht.....	25
3.1.4	Polarisation im Kursstrukturplan und in Schulbüchern	26
3.1.5	Historische Betrachtungen zur Polarisation	31
3.2	Fachlicher Hintergrund zur Quantenphysik	32
3.2.1	Der quantenmechanische Zustand.....	32
3.2.2	Die Wahrscheinlichkeit	35
3.2.3	Die Wahrscheinlichkeitsamplitude	36
3.2.4	Fundamentalprinzip.....	37
3.2.5	Quantenphysik im Kursstrukturplan und in Schulbüchern	40
3.2.6	Historische Betrachtungen zur Quantenphysik	44
4	Thematisch angrenzende Unterrichtskonzepte	46
4.1	Unterrichtskonzepte zur Polarisation	46
4.1.1	Polarisation und Wellenmodell	46
4.1.2	Polarisation und modellfreie Optik	47
4.2	Unterrichtskonzepte zur Einführung in die Quantenphysik.....	49
4.2.1	Eine Einführung in die Quantentheorie für Leistungskursschüler.....	49
4.2.2	Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik.....	51
4.2.3	Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“	53
4.2.4	Zeigerformalismus und Quantenphysik	55
4.3	Polarisation von Licht als Zugang zur Quantenphysik	56
4.4	Bewertung der Unterrichtskonzepte.....	58

5	Darstellung des eigenen Unterrichtskonzeptes	61
5.1	Polarisiertes Licht.....	62
5.1.1	Die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors	64
5.1.2	Polarisiertes Himmelslicht	67
5.2	Polarisation wahrnehmen	71
5.2.1	Navigation der Insekten	72
5.2.2	Haidinger-Büschel.....	75
5.3	Klassische Polarisationsexperimente	79
5.3.1	Malussches Gesetz	80
5.3.2	Überlagerung von polarisiertem Licht	84
5.4	Polarisation in der Photonenvorstellung.....	92
5.4.1	Der Polarisationszustand	92
5.4.2	Die Wahrscheinlichkeit in der Quantenphysik.....	95
5.4.3	Der Produktsatz	97
5.4.4	Überlagerung von Polarisationszuständen	98
5.4.5	Wahrscheinlichkeitsamplitude und Superpositionsprinzip	99
5.4.6	Lokalisationsproblem und Fundamentalprinzip.....	101
5.5	Fachdidaktische Anmerkungen zum Unterrichtskonzept.....	105
5.5.1	Lernen in Kontexten.....	106
5.5.2	Von der Anschaulichkeit zum Abstrakten	106
5.5.3	Elemente des Unterrichtskonzeptes	108
5.5.4	Zielgruppe und Anforderungen	111
6	Unterrichtserfahrungen und Evaluation.....	113
6.1	Unterrichtsversuch I	114
6.1.1	Vorfragebogen zur Polarisation von Licht	114
6.1.2	Ergebnisse aus dem Vorfragebogen zur Polarisation von Licht	115
6.1.3	Inhalte des Unterrichts zum Thema Polarisation von Licht.....	115
6.1.4	Vorfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe	116
6.1.5	Ergebnisse des Vorfragebogens	117
6.1.6	Inhalte des Unterrichts zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe	118
6.1.7	Nachfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe	119
6.1.8	Ergebnisse des Nachfragebogens	119
6.2	Unterrichtsversuch II.....	120
6.2.1	Vorfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe	121
6.2.2	Ergebnisse des Vorfragebogens	122
6.2.3	Inhalte des Unterrichts zur Einführung quantenphysikalischer Begriffe	122
6.2.4	Nachfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe	123
6.2.5	Ergebnisse Nachfragebogen.....	123
6.3	Ergebnis der Unterrichtsversuche	124
7	Zusammenfassung	126
	Literaturverzeichnis	129
	Anhang.....	135

1 Einleitung

Die Beschreibung der Natur in mikroskopischen Bereichen durch die Quantentheorie gehört zu den geistigen Errungenschaften unserer Zeit und hat unser Wissenschaftsverständnis grundlegend beeinflusst. So ist es nicht verwunderlich, dass die Quantenphysik ein verpflichtender und etablierter Unterrichtsinhalt der gymnasialen Oberstufe ist, durch den das Weltbild der Schülerinnen und Schüler¹ um den Aspekt der „modernen“ Physik erweitert werden soll. Allerdings gilt die Quantenphysik im Gegensatz zu klassischen Themen als abstrakt und unanschaulich. Durch den mathematischen Formalismus und die Schwierigkeiten bei der Begriffsbildung gehört die Quantenphysik ohne Zweifel zu den anspruchvollsten Themen der Schulphysik.

Im Hinblick auf die Entwicklung von Unterrichtskonzepten zur Einführung der Quantenphysik im Schulunterricht müssen im Wesentlichen zwei Perspektiven berücksichtigt werden. Dies ist zum einen die pädagogische Sicht, aus der es gilt eine Entscheidung zu treffen, auf welchem methodischen Weg die Inhalte unterrichtet werden sollen, zum anderen die fachliche Sicht, in der es um eine Klärung und Aufbereitung der fachlichen Inhalte für den Unterricht geht.

Aus pädagogischer Sicht wird es für den Ablauf von Lernprozessen als günstig angesehen, wenn der Ausgangspunkt sinnlich wahrnehmbare Phänomene, konkrete Objekte, Ereignisse und Handlungen sind. Für den Physikunterricht heißt dies, dass er mit einem Studium der Phänomene beginnen sollte, die direkt beobachtet und erfahren werden können. Zudem wird es als sinnvoll angesehen, dass Inhalte aufeinander aufbauen, so dass die Schülerinnen und Schüler im Verlaufe ihres Unterrichts durch die Vernetzung von Inhalten einen Einblick in die Struktur der Physik bekommen können. Aus fachlicher Sicht müssen dagegen die wesentlichen Begriffe und Prinzipien herausgearbeitet werden, die das Grundlegende des physikalischen Sachverhaltes beschreiben. In einem weiteren Schritt müssen diese Begriffe und Prinzipien auf ein für den Schulunterricht angemessenes Niveau gebracht werden.

¹ Aus sprachlichen Gründen werden in dieser Arbeit nicht in jedem Fall sowohl die männliche als auch die weibliche Form verwendet.

Für die Entwicklung von Unterrichtsinhalten zum Thema Quantenphysik erscheint es zunächst nicht möglich, diese beiden Perspektiven gemeinsam zu verfolgen. Sowohl die Unanschaulichkeit quantenphysikalischer Inhalte als auch das „andersartige“ Verhalten quantenphysikalischer Objekte widersprechen vordergründig den oben formulierten Forderungen. Ein Aufbauen quantenphysikalischer Inhalte auf die Beschreibung der klassischen Physik erscheint nicht möglich, und ein „Bruch“ in der Beschreibung wäre somit unumgänglich. Verschiedene fachdidaktische Konzepte, die in jüngster Zeit entwickelt wurden, führen diesen Bruch ganz bewusst durch, um hervorzuheben, dass die Quantenphysik nicht mit den Begriffen und Modellen der klassischen Physik beschrieben werden kann.

In der vorliegenden Arbeit soll nun untersucht werden, ob ein Unterrichtskonzept für die gymnasiale Oberstufe entwickelt werden kann, das sowohl den genannten Anforderungen aus pädagogischer Sicht als auch aus fachlicher Sicht genügen kann. Es wird ein „Lernweg“ aufgezeigt, der sowohl an das eigene Erleben angebunden ist als auch einen Zugang zur Quantenphysik ermöglicht. Auf diesem Lernweg sollen die Unterrichtsinhalte aufeinander aufbauen, so dass ein „harter Bruch“ zwischen der klassischen und der quantenphysikalischen Beschreibung möglichst vermieden werden kann.

Die vorliegende Arbeit ist so gegliedert, dass zunächst in Kapitel 2 das methodische Vorgehen für ein solches Unterrichtskonzept entwickelt wird. Dieses Vorgehen führt über drei Stufen vom Phänomen ausgehend zu quantitativen Experimenten bis hin zur Einführung „neuer“ Begriffe, die das quantenphysikalische Verhalten beschreiben. Mit diesen Stufen ist einerseits eine Abnahme der Anschaulichkeit, andererseits aber eine Zunahme der Tragfähigkeit der Modellbeschreibung verbunden. In Kapitel 3 werden dann die grundlegenden fachlichen Begriffe und Prinzipien beschrieben, die die zentralen Inhalte des Unterrichtskonzeptes bilden. Um dieses methodische Vorgehen mit anderen fachdidaktischen Ansätzen zur Einführung in die Quantenphysik zu vergleichen, werden in Kapitel 4 ausgewählte, aktuelle Arbeiten vorgestellt, die zum Teil den oben beschriebenen Bruch in der Beschreibung für notwendig erachten.

Die Umsetzung des methodischen Vorgehens und der fachlichen Inhalte zu einem konkreten Lernweg wird in Kapitel 5 dargestellt. Dort wird auf der Grundlage von Experimenten mit polarisiertem Licht ein Unterrichtskonzept entwickelt, das einen Elementarisierungsansatz zur Einführung in Begriffe und Prinzipien der Quantenphysik beschreibt. Obwohl die Polarisation von Licht derzeit im Physikunterricht eine eher untergeordnete Rolle spielt, wird gezeigt, dass dieses Thema die Möglichkeit bietet, von der Beobachtung ausgehend in die abstrakten

Unterrichtsinhalte der Quantenphysik einzuführen. Dabei erweist sich der elektrische Feldvektor als tragfähiges Modell, das zunächst die klassischen Polarisationsexperimente mit Licht beschreibt. Die Deutung dieser Experimente auf der Grundlage der Photonenvorstellung erfordert die Einführung von neuen Begriffen und Prinzipien im Unterricht, die das Verhalten der Photonen grundlegend beschreiben. Mit Hilfe von Analogiebetrachtungen wird dabei das Modell des elektrischen Feldvektors zur Wahrscheinlichkeitsamplitude weiterentwickelt, wodurch eher eine Verbindung als ein Bruch zwischen der klassischen und der quantenphysikalischen Beschreibung entsteht.

Gegenstand des sechsten Kapitels ist die unterrichtliche Erprobung einiger Teilaspekte des entwickelten Unterrichtskonzeptes in der Schule. Diese Unterrichtsversuche wurden mit einer empirischen Studie über die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Thema Polarisation und zu quantenphysikalischen Begriffen verbunden.

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst.

2 Fachdidaktischer Hintergrund

Physikdidaktik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, zu deren Bezugsdisziplinen die Physik und die anderen Naturwissenschaften, Pädagogik, Wissenschaftstheorie und -geschichte sowie weitere Fachrichtungen gehören. Es gibt in der Physikdidaktik eine Vielzahl von Forschungsrichtungen, deren vordringliches Ziel ist, das Lernen und Lehren im Physikunterricht zu verbessern. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Elementarisierungsansatz aufzuzeigen, der einen Zugang zu den grundlegenden quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien ermöglicht und dabei gleichzeitig an das eigene Erleben und die Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler angebunden ist.

In diesem Kapitel wird das didaktische Konzept für einen Lernweg beschrieben, der sowohl an das eigene Erleben und die Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler angebunden ist als auch einen Zugang zur abstrakten Quantenphysik ermöglicht. Es zeigt sich, dass für dieses Vorhaben das Gebiet der Optik besonders geeignet ist, da es durch die Sinneswahrnehmung eine direkte Verbindung zwischen physikalischen Phänomenen und dem eigenen Erleben ermöglicht. In dem im Rahmen dieser Arbeit entwickeltem Unterrichtsvorschlag (siehe Kapitel 5) wird deutlich, dass speziell das Thema der Polarisierung von Licht dafür geeignet erscheint, von einem Phänomen der natürlichen Umwelt ausgehend einen Zugang zu quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien zu ermöglichen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst in Kapitel 2.1 die übergeordneten fachdidaktischen Aspekte erörtert, die für das dieser Arbeit zugrunde liegende Vorhaben von Bedeutung sind. In Kapitel 2.2 wird die didaktische Struktur des Lernwegs vorgestellt. In einem weiteren Abschnitt werden Untersuchungen über Schülervorstellungen zu Inhalten, die diese Arbeit betreffen, zusammengefasst.

2.1 Übergreifende Aspekte

In diesem Abschnitt werden die Begriffe Anschaulichkeit und Abstraktheit sowie der Stellenwert der Modellbeschreibung erläutert, die für das Unterrichtskonzept von übergeordneter Bedeutung sind.

2.1.1 Anschaulichkeit und Abstraktheit

Als anschaulich werden Inhalte bezeichnet, die vertraut bzw. bekannt sind und nicht immer wieder hinterfragt werden müssen. Solche Inhalte stammen üblicherweise aus der gewohnten Umwelt, die sich durch ihre makroskopischen Strukturen auszeichnet, die mit unseren Sinnesorganen erfasst werden können. Im Physikunterricht sind dies beispielsweise Inhalte mit Alltagsbezug oder Phänomene, die an das eigene Erleben und Erfahren angebunden sind. Auch werden solche Strukturen als anschaulich bezeichnet, die sich „unmittelbar“ auf makroskopische Strukturen abbilden lassen, wie die Gestalt unseres Planetensystems auf ein Planetarium (Vollmer 1984).

Als abstrakt bezeichnet man eine Aussage oder Darstellung, die von der Realität des unmittelbar Wahrgenommenen, des Angeschauten abgehoben ist und nur noch im Gedanklichen, im Begrifflichen existiert. Dabei werden gemeinsame Merkmale vieler Einzeltatsachen zusammengefasst und hervorgehoben, Unterschiedliches vernachlässigt oder weggelassen, so dass die Darstellung oder Aussage auf viele Einzelfälle zutrifft. Sie besitzt damit einen hohen Allgemeinheitsgrad und einen großen Gültigkeitsumfang. Ein Vermindern der Abstraktheit ist dann als gegenläufiger Vorgang zu verstehen. Dies wird erreicht durch Rückführung zum Gegenständlichen, Anschaulichen, durch die Betrachtung von Einzelfällen und Einzelbeispielen. Mit dem Gewinn an Anschaulichkeit geht allerdings ein Verlust oder zumindest eine Einschränkung des Allgemeinheitsgrades und des Gültigkeitsumfanges der Aussage einher (Bleichroth 1999).

Die Quantenphysik ist somit sowohl unanschaulich, da ihre Objekte Bestandteil des für uns nicht direkt erfassbaren Mikrokosmos sind, als auch abstrakt durch den Formalismus, der das quantenphysikalische Verhalten beschreibt. Anscheinend muss ein Unterricht zur Quantenphysik notgedrungen mit dem erfolgreichen didaktischen Prinzip der Anschaulichkeit brechen, da die fachlichen Inhalte der Quantenphysik damit nicht in Einklang zu bringen sind. Der Anspruch dieser Arbeit, einen Zugang zur Quantenphysik zu konstruieren, der an das eigene Erleben und damit an anschauliche Inhalte angebunden ist, erscheint daher zunächst widersprüchlich. Dieser Widerspruch wird dadurch aufgelöst, dass sich die Anschaulichkeit in diesem Unterrichtskonzept nicht aus der Struktur der Inhalte ergibt, sondern aus der Modellbeschreibung und aus Analogiebetrachtungen. Anschaulichkeit und Abstraktion ergänzen sich somit auf diesem Lernweg, der von den Phänomenen ausgehend einen Zugang zur Quantenphysik beschreibt.

2.1.2 Modellbildung

Die Beschreibung physikalischer Phänomene und Sachverhalte mit Hilfe von Modellen ist eine bewährte Methode in der Physik. Im Zusammenhang mit physikalischen Theorien oder im Rahmen von Erklärungen und Deutungen physikalischer Sachverhalte werden Modelle verwendet, die die Wirklichkeit nicht vollständig, sondern immer nur unvollständig und symbolisch abbilden. Modelle stehen somit für etwas Anderes und haben eine Abbildungsfunktion, das bedeutet, sie bilden Eigenschaften und Strukturen des Anderen ab. Modelle können gegenständlich sein, wenn zum Beispiel etwas konkret aufgebaut ist. Sie können aber auch rein abstrakt, mathematisch sein, das heißt für etwas Anderes in Form von mathematischen Strukturen stehen (Duit 1992). Der Sinn von Modellen, durch ein Gedankenkonstrukt Phänomene zu beschreiben oder vorhersagbar zu machen, kann erst erkannt werden, wenn von der Phänomenebene abgehoben wird und die Inhalte der Physik durch dieses gedankliche Konstrukt verknüpft werden können. Weitere Inhalte lassen sich dann in diesen Zusammenhang einordnen. Das Modell bietet dadurch eine Art Ordnungsschema, in das physikalische Inhalte eingeordnet werden können (Kuhn 1991).

Bieten Modelle die Möglichkeit, auf vorangegangene Inhalte aufzubauen, so bezeichnet man sie als tragfähig. Ein tragfähiges Modell trifft Aussagen, die über einen weiten Darstellungsbereich der Inhalte beibehalten werden können. Dabei erweist sich das Modell von Inhalt zu Inhalt erklärungsmächtiger. Das bedeutet, je umfassender die Erklärungsmächtigkeit eines Modells ist, desto tragfähiger ist es. Allerdings steigt mit der Erklärungsmächtigkeit meist der Grad an Abstraktion. Dadurch können Inhalte, die später im Unterricht erlernt werden und abstrakter sind, trotzdem durch das Modell beschrieben werden. Tragfähige Modelle ermöglichen es so, dass Unterrichtsinhalte aufeinander aufbauen können. Diese inhaltliche Verzahnung über größere thematische Gebiete wird als vertikale Vernetzung der Inhalte bezeichnet. Für die Schülerinnen und Schüler bietet sich beim Vorliegen derartiger strukturierter Inhalte die Möglichkeit zum „kumulativen Lernen“ (Erb 1999).

Besonders im Bereich der Quantenphysik ist die Modellbildung von Bedeutung, denn dort gilt es, einen Übergang von den klassischen Modellen hin zu abstrakteren Modellen zu finden, die das quantenphysikalische Verhalten beschreiben. Anscheinend ist bei diesem Übergang ein Bruch in der Modellbeschreibung unumgänglich, da die Inhalte der Quantenphysik aufgrund ihrer Andersartigkeit nicht mit den klassischen Inhalten verzahnt werden können. Eine vertikale Vernetzung dieser beiden Themengebiete wäre somit nicht möglich.

Trotzdem hat das in dieser Arbeit dargestellte Unterrichtskonzept den Anspruch, einen Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik als „bruchlosen“ Weg darzustellen. Die Optik und im Speziellen das Thema der Polarisierung von Licht bietet durch das Modell des elektrischen Feldvektors die Möglichkeit, Elemente der klassischen Physik mit Elementen der Quantenphysik horizontal zu vernetzen. Die horizontale Vernetzung von Inhalten im Physikunterricht wird von der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung in ihrer Expertise, die in der Folge von TIMSS (Baumert 1997) angefertigt worden ist, als ein Ziel des Unterrichts im Rahmen einer modernen Allgemeinbildung angesehen (BLK 1997).

2.2 Die drei Stufen des Unterrichtskonzeptes

Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Unterrichtskonzeptes wird ein Elementarisierungsansatz zur Einführung quantenphysikalischer Begriffe und Prinzipien auf der Grundlage von Experimenten mit polarisiertem Licht vorgestellt (siehe Kapitel 5). Das Unterrichtskonzept beschreibt einen Lernweg, der vom optischen Phänomen der Polarisierung ausgehend einen Zugang zu quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien ermöglicht. Die Struktur und das didaktische Vorgehen auf diesem Lernweg ist in drei Stufen unterteilt, die schematisch in Abbildung 1 dargestellt sind.

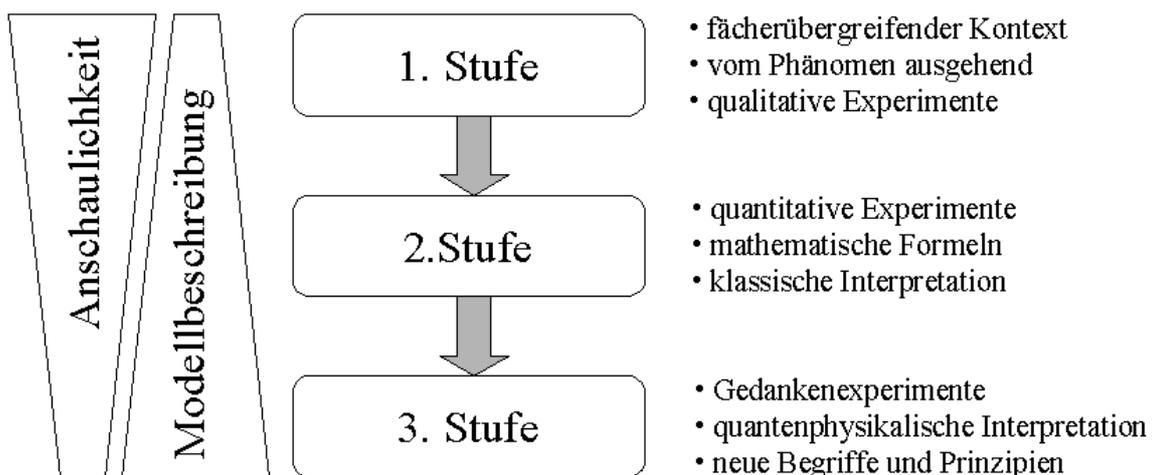


Abbildung 1: Didaktisches Vorgehen des Lernweges.

Im Folgenden werden die fachdidaktischen Grundlagen der drei Stufen des Lernweges im Zusammenhang mit dem Unterrichtskonzept, das in Kapitel 5 dargestellt ist, beschrieben.

2.2.1 Erste Stufe

2.2.1.1 Lernen in Kontexten und fächerübergreifender Unterricht

Zu Beginn des Unterrichtsganges wird das physikalische Thema der Polarisation von Licht innerhalb eines biologischen und zum Teil medizinischen Zusammenhangs erarbeitet. Dieses Vorgehen entspricht der Forderung von Muckenfuß nach „Lernen im sinnstiftenden Kontext“, wobei das Gefüge, in das das physikalische Thema eingebettet ist, als Rahmenkontext bezeichnet wird (Muckenfuß 1995). Das Ziel dabei ist es, zwischen physikalischer Sachstruktur und Rahmenkontext lebensnahe und lebenspraktische Bezüge gemeinsam mit physikalischen Sachstrukturen als Einheit zu unterrichten, wobei gleichzeitig Verbindungen zur Lebenspraxis und zu anderen Fächern hergestellt werden. Die erarbeiteten physikalischen Inhalte können dann auf weitere Kontexte übertragen werden.

Ergebnisse von Untersuchungen zum Schülerinteresse zeigen, dass das Interesse der Schülerinnen und Schüler am Physikunterricht sehr stark vom Kontext abhängt, innerhalb dessen die physikalischen Inhalte vermittelt werden. Mädchen sind demnach überwiegend an Alltagsanwendungen und medizinischen Kontexten interessiert. Jungen äußern sich ähnlich, sind im Gegensatz zu den Mädchen allerdings auch an technischen Anwendungen interessiert (Todt 1988). Weiterhin wurde festgestellt, dass den Kontexten die mit Abstand größte Bedeutung für die Ausprägung des Sachinteresses zukommt (Häußler 1995). Die Autoren der Untersuchung kommen zu dem Schluss „..., daß Physik für Mädchen und Jungen interessanter wird, wenn sie in einen anwendungsbezogenen Kontext eingebettet ist.“ (Häußler 1995, S. 112). Die für die Mittelstufe erhobenen Ergebnisse dieser Untersuchung sind in gleicher Weise auch für die Oberstufe gültig (Berger 2000).

Innerhalb dieses Rahmenkontextes werden anhand des Themas Polarisation von Licht Verbindungen zwischen den Fächern Physik und Biologie aufgezeigt. Dieser fächerübergreifende Unterricht beschreibt dabei eine Organisationsform des Unterrichts, die den Fachunterricht durch zeitweilige Aufhebung der Fächergrenzen ergänzen soll. Die Ausrichtung des Unterrichts kann je nach Verhältnis des fächerübergreifenden Unterrichts zu denzelfächern in weitere unterscheidbare Formen der Unterrichtsorganisation differenziert werden. Eine Form des fächerübergreifenden Unterrichts stellt dabei der fachüberschreitende Unterricht dar, der bei der Behandlung eines Themas in einem Unterrichtsfach, wie in diesem Beispiel das Thema Polarisation von Licht, über die Grenzen seiner besonderen Begriffe und

Theorien hinaus auf Erkenntnisse anderer Schulfächer zurückgreift (Häußler 1998). Dabei ist der Ausgangspunkt eine spezielle Thematik im Fach, die durch Erkenntnisse aus anderen Fächern unterstützt und erweitert wird. In dieser Form des fächerübergreifenden Unterrichts werden von der Lehrkraft zwar Kenntnisse aus der jeweils anderen Bezugswissenschaft verlangt, aber keine besonderen unterrichtsorganisatorischen Maßnahmen, da der Unterricht im Einzelfach stattfindet. Die in das Einzelfach eingebrachten Erkenntnisse dienen zur Ausweitung und Vertiefung der Fachziele. Die Voraussetzung für fachüberschreitenden Unterricht ist eine sachliche und fachwissenschaftliche Grundlage im Fach für die zu unterrichtenden Inhalte. Die Inhalte des klassischen Physikunterrichts dürfen dabei nicht verloren gehen, sondern sie sollten lediglich im Sinne einer Ergänzung an Fragestellungen eines anderen Faches gekoppelt werden (Bleichroth 1999).

Obwohl Lehrplankommissionen zunehmend versuchen, dem fächerübergreifenden Unterricht mehr Unterrichtszeit im Lehrplan einzuräumen, kommt die überfachliche Perspektive in den Schulen im Allgemeinen zu kurz. Ein Hinweis auf mögliche Probleme bei der Realisierung von fächerübergreifendem Unterricht ist der Mangel an handhabbaren, ausgearbeiteten Themenbeispielen (Schwarze 1997). Mit der Polarisation von Licht zeigt diese Arbeit ein Beispiel auf, ein Thema im Schulunterricht fächerübergreifend zu unterrichten, ohne dabei die Kompetenz der Lehrerinnen und Lehrer und das Leistungsvermögen der Schülerinnen und Schüler zu übersteigen. Auch die Bund-Länder-Kommission formuliert in ihrer Expertise, dass das Lernen in lebensnahen, sinnstiftenden Kontexten ein Ziel des Fachunterrichts ist (BLK 1997).

2.2.1.2 Phänomene

Am Anfang eines neuen Themas im Physikunterricht steht oft die Wahrnehmung bzw. die Beobachtung des dazugehörigen physikalischen Phänomens durch die Schülerinnen und Schüler. Dieser Vorgang ist nach Ansicht Martin Wagenscheins der Ausgangspunkt für das Verstehen und das langfristige Behalten eines physikalischen Sachverhaltes: „Zum Verstehen gehört: Stehen auf den Phänomenen“ (Wagenschein 1989, S. 135). Wagenschein sieht in den Phänomenen die Fundamente der Naturwissenschaft. Der unmittelbare Umgang mit den Phänomenen ist der Zugang zur Physik, von denen das Verstehen eines physikalischen Inhalts ausgeht und dann weiterentwickelt wird. Ein übereilter Griff zu quantitativen belehrenden Experimenten und missverständlichen Modellvorstellungen zerreißt seiner Meinung nach die Verbindung zu den Naturphänomenen und stört ihre Wahrnehmung, anstatt sie zu steigern. In

dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtsvorschlag wird gezeigt, dass auch das Phänomen der Polarisation, als vermeintlich unsichtbare Eigenschaft des Lichts, mit der menschlichen Wahrnehmung erfasst und als Ausgangspunkt für das Erschließen dieses physikalischen Sachverhaltes genutzt werden kann.

2.2.2 Zweite Stufe

2.2.2.1 Experimente und Messgrößen

Bereits in der ersten Stufe wird durch Schülerexperimente das physikalische Phänomen der Polarisation qualitativ untersucht, wodurch verblüffende Effekte einprägsam vorgestellt werden ohne großen apparativen Aufwand und ohne Geräte, die den Blick auf das Wesentliche verdecken. In weiteren, zunächst qualitativen Demonstrationsexperimenten wird das physikalische Phänomen weiter erforscht.

In der zweiten Stufe des Unterrichtskonzeptes wird nun das zuvor qualitativ beobachtete Phänomen mit Hilfe von quantitativen Demonstrationsexperimenten näher untersucht. Der Begriff des Experiments bezeichnet dabei eine spezielle apparative Anordnung, die physikalische Vorgänge unter reproduzierbaren und variierbaren Bedingungen beobachtbar macht und die entwickelt wird, um Hypothesen und Prognosen im Zusammenhang physikalischer Theorien zu prüfen (Bleichroth 1999). Mit Hilfe von quantitativen Experimenten werden Messergebnisse gewonnen, deren Interpretation eine bereits bestehende Theorie stützen kann. Das Demonstrationsexperiment zeigt Phänomene aus einer bestimmten fachspezifischen Sicht. Es rückt fachliche Fragestellungen in den Mittelpunkt und liefert Antworten der Natur. Teil der Funktion des Physikunterrichts ist es, deutlich zu machen, wie physikalische Erkenntnisse gewonnen werden und wie das Experiment als Bindeglied zwischen Theorie und Realität steht. Quantitative Experimente sind besonders geeignet, wissenschaftstheoretische Aspekte der Physik zu illustrieren, wie z.B. das Wechselspiel von Theorie und Experiment und das Ringen um sinnvolle Daten und deren Interpretation. In das Experiment werden Messinstrumente aufgenommen, deren Funktionsweise dargestellt werden muss, und es müssen Messgrößen zu den bis dahin qualitativen oder halbquantitativen Begriffen eingeführt werden. Messwerte, die nicht direkt mit den Sinnen zu erfassen sind, werden von physikalischen Messgeräten geliefert. Es werden nun spezielle Symbole für die physikalischen Begriffe eingeführt, und die einzelnen Messungen des quantitativen Experimentes werden in Messwerttabellen erfasst. Im nächsten Schritt werden mögliche Proportionalitäten mit Hilfe

der Messwerte geprüft, und die Ergebnisse werden in einer mathematischen Darstellung formuliert (Kircher 2000).

Im Unterrichtskonzept werden zunächst qualitative Experimente zur Beobachtung der Lichtintensität durchgeführt, die dann in quantitativen Experimenten durch Messungen mit der Messgröße Intensität verbunden werden. Die zentrale quantitative Aussage in den Experimenten mit polarisiertem Licht, die von allgemeiner Bedeutung ist, wird als Malussches Gesetz bezeichnet. Die Anwendung des Gesetzes kann nun in weiteren Experimenten zur Berechnung erwarteter Ergebnisse genutzt werden. Dabei findet eine Überprüfung des Gesetzes oder eine Feststellung von Abweichungen durch weitere Messungen statt.

In der nächsten Stufe des Unterrichtskonzeptes wird dieses gefundene Gesetz in der Photonenvorstellung von Licht interpretiert, wodurch neue Begriffe und Zusammenhänge entwickelt werden, die zu einer Erweiterung der Erkenntnisse führen. Dazu werden die bereits real durchgeführten Polarisationsexperimente als Gedankenexperimente wiederholt, wobei die Gedankenexperimente eine Extrapolation in Bereiche ermöglichen, die im Realexperiment nicht erreichbar sind.

2.2.3 Dritte Stufe

2.2.3.1 Elementarisierung

In der dritten Stufe des Unterrichtskonzeptes werden auf der Grundlage der bereits vorangegangenen Stufen quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien erarbeitet. Der Anspruch ist dabei, komplizierte physikalische Zusammenhänge und Sachverhalte so zu vereinfachen, dass sie von möglichst allen Schülerinnen und Schülern verstanden werden. Die Aufbereitung von Sachstrukturen für den Unterricht wird allgemein als „didaktische Reduktion“ oder in der Physikdidaktik bevorzugt als „Elementarisierung“ bezeichnet (Kircher 2000). In den letzten Jahren ist zudem von Kattmann der Ausdruck der „didaktischen Rekonstruktion“ eingeführt worden (Kattmann 1997). Die didaktische Rekonstruktion berücksichtigt im Wesentlichen zwei Elemente, von denen das erste Element die didaktische Reduktion ist, die sowohl aus der Identifizierung der tragenden Grundbegriffe eines Sachbereichs als auch aus der Vereinfachung dieser Grundbegriffe besteht. Das zweite Element berücksichtigt die Perspektiven der Lernenden und dabei insbesondere ihre vorunterrichtlichen Vorstellungen. In einem wechselseitigen Prozess von empirischen und fachlichen Analysen werden die Unterrichtsinhalte dann schrittweise weiterentwickelt (Häußler 1998).

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt im Bereich der Elementarisierung von fachlichen Inhalten für den Physikunterricht. Dabei wird unter Elementarisierung zum einen die Vereinfachung eines physikalischen Sachverhaltes verstanden und zum anderen das Identifizieren der grundlegenden Ideen. Das Elementarisieren im Sinne der Vereinfachung bedeutet ein Absenken von einem physikalisch höheren Niveau auf ein niedrigeres, das durch ein Vermindern der Abstraktheit oder einen Abbau der Komplexität erreicht werden kann (Bleichroth 1999). Die Inhalte sollen dabei sowohl mit der Zielsetzung des Physikunterrichts vereinbar sein als auch auf einem Niveau unterrichtet werden können, das den Leistungsmöglichkeiten der Schülerinnen und Schüler entspricht. Bei der Entwicklung von elementarisierten Inhalten sind Kriterien zu berücksichtigen, die die Güte und Zulässigkeit der Elementarisierung bestimmen. Zu diesen Kriterien gehört die Voraussetzung, dass der elementarisierte Inhalt in die kognitive Struktur der Schülerinnen und Schüler passt. Ebenfalls sollte der elementarisierte Inhalt grundsätzlich vom Standpunkt der Wissenschaft Physik als richtig angesehen werden können und fachlich erweiterbar sein, so dass in späteren Schulstufen die grundlegende Bedeutung der Elementarisierung erhalten bleibt und lediglich neue und erweiterte Eigenschaften hinzugefügt werden können.

Der zweite Gesichtspunkt von Elementarisierung ist die im Wortstamm liegende Bedeutung von „elementar“ oder „grundlegend“. Elementarisierung unter diesem Aspekt betrachtet ist das Identifizieren der grundlegenden Idee oder der allgemeinen Gesetzmäßigkeit eines physikalischen Sachbereiches, das weitere Inhalte zu erschließen vermag (Häußler 1998). In dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtskonzept werden in diesem Sinne ausgewählte Begriffe und Prinzipien eingeführt, die das grundlegende Verhalten quantenphysikalischer Objekte beschreiben.

2.2.3.2 Analogien

In der dritten Stufe wird zur Erklärung von noch Unbekanntem das Mittel der Analogie benutzt. Analogien übernehmen die wichtige Rolle, den Schülerinnen und Schülern Unbekanntes durch Rückgriff auf bereits bekanntes verständlich zu machen. Dabei handelt es sich um Ähnlichkeiten zweier Bereiche hinsichtlich bestimmter Strukturen, wobei auf den Bereich des Bekannten zurückgegriffen wird, um den Bereich des Neuen zu erklären. Auch im Alltag wird häufig von Analogien Gebrauch gemacht in Form von Erklärungsfiguren wie „Das ist so ähnlich wie...“, um auf diese Weise etwas Unbekanntes zu erklären.

Eine Analogie im Unterricht anzuwenden ist nur dann sinnvoll, wenn der Analogbereich den Schülerinnen und Schülern gut vertraut ist und wenn deutlich geworden ist, dass es in unterschiedlichen Bereichen der Physik ähnliche Strukturen gibt. Viele Analogien stellen Bilder bereit, die helfen sollen, das Neue und meist Abstrakte zu veranschaulichen. Dadurch wird das Verständnis von abstrakten Begriffen durch Vergleich mit Dingen und Vorgängen aus der realen Welt bzw. dem bekannten Bereich ermöglicht (Duit 1992). Nach Spreckelsen basiert der Verstehensprozess „... auf dem Vergleichen von Einzelercheinungen, d.h. auf einem Verstehensprozess qua Analogie.“ (Spreckelsen 2001). In dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtskonzept wird durch Analogiebetrachtungen von der klassischen Beschreibung der Polarisationsexperimente mit Hilfe des elektrischen Feldvektors auf die quantenphysikalische Beschreibung dieser Experimente in der Photonenvorstellung geschlossen.

2.3 Schülervorstellungen

Eine Reihe von Untersuchungen zur Bedeutung von Schülervorstellungen haben gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler in der Regel mit Vorstellungen in den naturwissenschaftlichen Unterricht kommen, die mit den zu lernenden naturwissenschaftlichen Inhalten nicht vereinbar sind. Unter Schülervorstellungen werden alle kognitiven individuellen Konstrukte von Schülerinnen und Schülern zu einem bestimmten Thema zusammengefasst, wie zum Beispiel Begriffe, Theorien und Konzepte. Oft gelingt es dem Unterricht nur in sehr eingeschränktem Maße, den Schülerinnen und Schülern die naturwissenschaftlichen Vorstellungen näher zu bringen. Häufig stehen sich Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftliche Vorstellungen konträr gegenüber und führen zu Lernschwierigkeiten bei bestimmten physikalischen Sachverhalten. Unter Berücksichtigung der Schülervorstellungen kann gegebenenfalls eine alternative Vorgehensweise für den Unterricht entwickelt werden, die den Lernschwierigkeiten entgegengewirkt. Aus diesem Grund werden im Folgenden Untersuchungen zu Schülervorstellungen im Bereich der Quantenphysik und speziell zum Thema Licht vorgestellt, die im Zusammenhang mit dem in dieser Arbeit entwickelten Unterrichtskonzept berücksichtigt werden müssen.

Untersuchungen zu Schülervorstellungen im Bereich der „modernen“ Physik befassen sich überwiegend mit den Vorstellungen zur Struktur der Materie, Atomvorstellungen und Radioaktivität. Besonders Michael Lichtfeldt (Lichtfeldt 1991) und Hartmut Wiesner

(Wiesner 1989) führten Untersuchungen zu Schülervorstellungen speziell zu Inhalten der Quantenmechanik mit zum Teil großen Schüler- und Studentenzahlen durch. Die Ergebnisse im Bereich der Vorstellungen zum Licht zeigten, dass die meisten Schülerinnen und Schüler bereits vor dem Unterricht zur Quantenphysik mehrere Vorstellungskonstrukte vom Licht nebeneinander haben. Es zeigte sich eine deutliche Bereitschaft der Schülerinnen und Schüler dem Licht mehrere Merkmale zuzuschreiben, wobei anscheinend durch den „Strahl-Welle-Dualismus“ eine doppelgleisige Denkweise angelegt wurde, die mit der Teilchenvorstellung von Licht zu einer dreigleisigen Denkweise ausgebaut werden kann. Interessant dabei erscheint es, dass etwa die Hälfte der befragten Schülerinnen und Schüler bereits vor einem entsprechenden Unterricht eine Art Teilchenvorstellung vom Licht hatte (Lichtfeldt 1991).

Lichtfeldt hat in seiner Untersuchung ebenfalls die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zu erkenntnistheoretischen Fragestellungen untersucht. In dem Antwortverhalten der Schülerinnen und Schüler über ihre Vorstellungen zu wissenschaftstheoretischen Aspekten spiegelt sich die im Physikunterricht erlebte Situation wider. Aus den Antworten lässt sich schließen, dass das Experiment bezüglich der Erkenntnisgewinnung und des Nachweises der Allgemeingültigkeit von physikalischen Aussagen einen sehr hohen Stellenwert einnimmt. Dabei vertrauen die Schülerinnen und Schüler den Anzeigen der Messinstrumente, oft ohne einen Zusammenhang zwischen Messung und physikalischem Vorgang zu sehen. Diese Meinung begünstigt die Einstellung, dass in der Physik prinzipiell alles erklärbar sei und noch ausstehende Fragen im Laufe der Zeit schon beantwortet werden. Gerade im Hinblick auf das Problem des Messvorgangs in der Quantenphysik ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung.

3 Fachlicher Hintergrund

Dieses Kapitel gibt einen fachlichen Überblick über die Inhalte des in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtsvorschlages, in dem anhand der Polarisations-eigenschaft des Lichts und dessen Beschreibung durch den elektrischen Feldvektor eine Einführung in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien vorgestellt wird. In Kapitel 3.1 wird die Sachanalyse zum Thema „Polarisation von Licht“ gegeben und in Kapitel 3.2 die Sachanalyse von ausgewählten quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien, die für den entwickelten Unterrichtsvorschlag von Bedeutung sind.

Für beide physikalischen Inhalte, sowohl für die Polarisation von Licht als auch für die Quantenphysik, wird der Stellenwert der Themen im Kursstrukturplan und ihre Darstellung in drei ausgesuchten Schulbüchern beschrieben. Dabei wird gezeigt, dass das Thema der „Polarisation von Licht“ im Kursstrukturplan keine Bedeutung hat. Einen ähnlich untergeordneten Stellenwert nimmt die Polarisation auch in den Schulbüchern ein, in denen darüber hinaus mit einer irreführenden Analogie-betrachtung die Wirkungsweise des Polarisationsfilters veranschaulicht werden soll. Ganz im Gegensatz zur Polarisation haben quantenphysikalische Inhalte einen großen Stellenwert sowohl im Kursstrukturplan als auch in den vorgestellten Schulbüchern. Dort erscheint es eher schwierig aus der Fülle von Themen mit zum Teil hohem Anspruch, die nicht immer aufeinander aufbauen, Unterrichtsinhalte auszuwählen.

Über diese Darstellungen hinausgehend, werden zu beiden Themen historische Betrachtungen gegeben, die die Entwicklung dieser Inhalte in einen zeitlichen Rahmen einordnen. Diese historischen Betrachtungen sind auch für den Schulunterricht relevant, da durch die Entwicklung von physikalischen Begriffen und Forschungsmethoden der naturwissenschaftliche Erkenntnisweg am Beispiel der Disziplin Physik aufgezeigt werden kann.

3.1 Fachlicher Hintergrund zur Polarisation von Licht

In diesem Abschnitt wird die Beschreibung und Erzeugung von linear polarisiertem Licht sowie die Interferenz von polarisiertem Licht auf der Grundlage der Wellentheorie dargestellt. Die fachlichen Inhalte dieses Kapitels stützen sich in wesentlichen Teilen auf die Darstellung im Lehrbuch „Optik“ von Eugene Hecht (Hecht 1989).

3.1.1 Beschreibung von linear polarisiertem Licht

Licht kann im Wellenmodell als eine transversale elektromagnetische Welle dargestellt werden. Das elektrische Feld $\vec{E}(z,t)$ und das magnetische Feld $\vec{B}(z,t)$ einer sich in z -Richtung ausbreitenden elektromagnetischen Welle stehen, wie in Abbildung 2 dargestellt, senkrecht aufeinander.

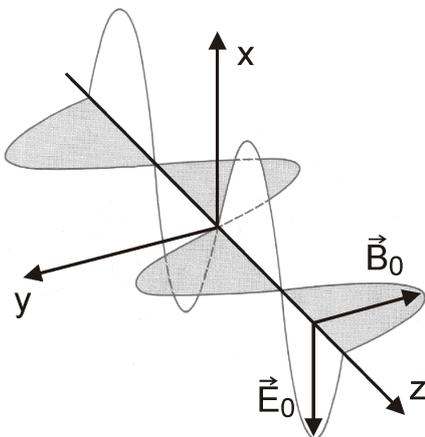


Abbildung 2: Darstellung einer elektromagnetischen Welle (nach Hecht 1989).

Der elektrische Feldvektor \vec{E}_0 ist die Schwingungsamplitude des elektrischen Feldes zu einer bestimmten Zeit t und liegt in Abbildung 2 in der x - y -Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist. Beschreibt der elektrische Feldvektor im Falle einer ebenen elektromagnetischen Welle entlang einer festen, auf der Ausbreitungsrichtung z senkrecht stehenden Geraden eine hin- und hergehende Bewegung, so dass die Orientierung des elektrischen Feldes konstant ist, so bezeichnet man die elektromagnetische Welle als linear polarisiert.

Im allgemeinen Fall kann eine elektromagnetische Welle in eine Richtung linear polarisiert sein, die weder mit der x -Achse noch mit der y -Achse zusammenfällt. Abbildung 3 zeigt, dass

aus der Überlagerung zweier unabhängiger transversaler Komponenten des elektrischen Feldes, die entlang der x -Achse und der y -Achse gewählt werden können, die linear polarisierte elektromagnetische Welle dargestellt werden kann. Mit Hilfe dieser Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors werden alle Polarisationsexperimente des in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtsvorschlages beschrieben.

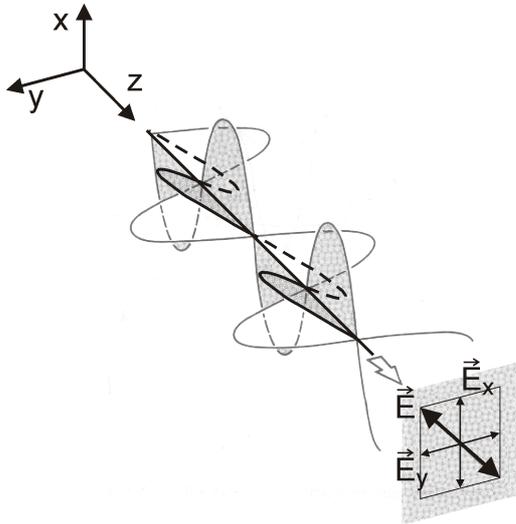


Abbildung 3: Abbildung von linear polarisiertem Licht (nach Hecht 1989).

Als natürliches oder unpolarisiertes Licht bezeichnet man Licht, das sich aus einer schnell veränderlichen Folge von verschiedenen Polarisationsrichtungen zusammensetzt. Verändert sich die Orientierung des elektrischen Feldvektors weder völlig unregelmäßig noch völlig regelmäßig, so wird das Licht als teilweise polarisiert bezeichnet.

Natürliches Licht ist im Allgemeinen nicht von sich aus linear polarisiert. Eine ausgezeichnete Polarisationsrichtung kann dann entstehen, wenn Licht auf Materie trifft und mit den Molekülen oder Atomen wechselwirkt. Dabei werden die Elektronen durch die elektromagnetische Welle mit einer Frequenz in Schwingung versetzt, die gleich der Antriebsfrequenz der einfallenden Lichtwelle ist. Die Amplitude der Schwingung der Elektronen ist nur dann groß, wenn sich die Antriebsfrequenz in der Nähe der Resonanzfrequenz des Atoms befindet. Bei Resonanz kann eine einfache Beschreibung des Atoms angewendet werden, in der sich anfangs das Atom im Grundzustand befindet. Bei Absorption eines Photons mit der Resonanzfrequenz geht das Atom in einen angeregten Zustand über. In dichten Medien kehren die Atome mit größter Wahrscheinlichkeit in den Grundzustand zurück, nachdem sie ihre zusätzliche Energie in Form von Wärme dissipiert haben. In dünnen Gasen hingegen werden die Atome im Allgemeinen durch die Ausstrahlung von Photonen in den Grundzustand zurückgeführt, ein Effekt, der als Resonanzstrahlung bezeichnet wird.

Bei Frequenzen unterhalb oder oberhalb der Resonanzfrequenz verhalten sich die Elektronen wie oszillierende elektrische Dipole. Sie strahlen elektromagnetische Energie mit einer Frequenz wieder ab, die mit der des einfallenden Lichts übereinstimmt. Diese nichtresonante Emission breitet sich als Dipolstrahlung im Raum aus und wird als Streuung bezeichnet. Sie ist für die Reflexion, Brechung und Beugung bei der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie der eigentlich entscheidende und fundamentale Mechanismus.

Obwohl die Energieemissionsrate ein quantenmechanischer Prozess ist, kann dieser Vorgang durch einen klassischen oszillierenden elektrischen Dipol dargestellt werden. Abbildung 4 veranschaulicht die Abstrahlungscharakteristik des oszillierenden elektrischen Dipols, der in Bewegungsrichtung nicht abstrahlt und senkrecht zur Bewegungsrichtung maximal abstrahlt.

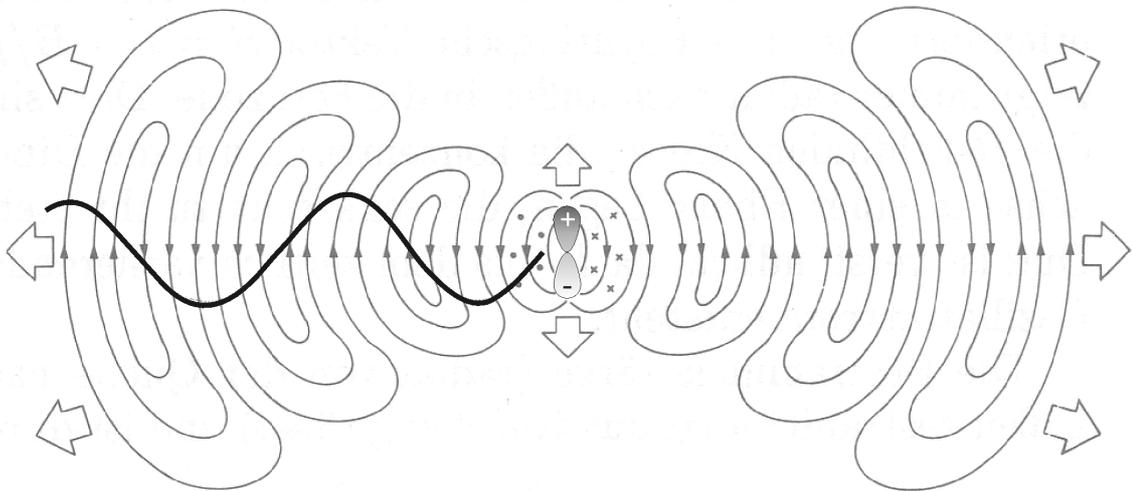


Abbildung 4: Das elektrische Feld eines oszillierenden elektrischen Dipols (nach Hecht 1989).

Dieses Oszillatormodell beschreibt nicht nur die Entstehung von elektromagnetischen Wellen bei der Wechselwirkung von Licht und Materie, sondern kann durch seine Abstrahlcharakteristik auch die Polarisationsrichtung erklären. Die elektrische Dipolstrahlung bietet damit einen einfachen Mechanismus, mit dem die Erzeugung von linear polarisierten elektromagnetischen Wellen beschrieben werden kann. Auf die Beschreibung von zirkular polarisiertem Licht wird an dieser Stelle verzichtet, da im Unterrichtskonzept (siehe Kapitel 5) ausschließlich linear polarisiertes Licht verwendet wird.

3.1.2 Erzeugung von linear polarisiertem Licht

Im Folgenden werden einige für den in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtsvorschlag relevante experimentelle Methoden vorgestellt, mit denen linear polarisiertes Licht erzeugt werden

kann. Optische Geräte und Materialien, die einen Einfluss auf die Polarisationsrichtung des Lichts haben, werden als Polarisatoren bezeichnet. Die Funktionsweise der Polarisatoren basiert auf einem von vier fundamentalen physikalischen Mechanismen: Selektive Absorption, Reflexion, Streuung oder Doppelbrechung. Alle vier Mechanismen haben als grundlegende Eigenschaft eine gewisse Form von Asymmetrie gemeinsam, die gewöhnlich im Stoff bzw. Aufbau des Polarisators begründet ist. In den folgenden Abschnitten werden selektive Absorption, Reflexion und Streuung näher beschrieben.

3.1.2.1 Polarisation durch selektive Absorption

Der Polarisator, der durch selektive Absorption polarisiertes Licht erzeugt, ist physikalisch anisotrop und erzeugt dadurch eine starke asymmetrische Absorption für eine Komponente des elektrischen Feldes, während er für die dazu senkrechte Komponente im Wesentlichen durchlässig ist.

Der Aufbau eines Polarisators ist im Wellenlängenbereich der Mikrowellen anschaulich zu sehen (siehe Abbildung 5). Der Polarisator für Mikrowellen besteht aus parallel zueinander angeordneten leitenden Drähten und wird als Drahtgitterpolarisator bezeichnet.

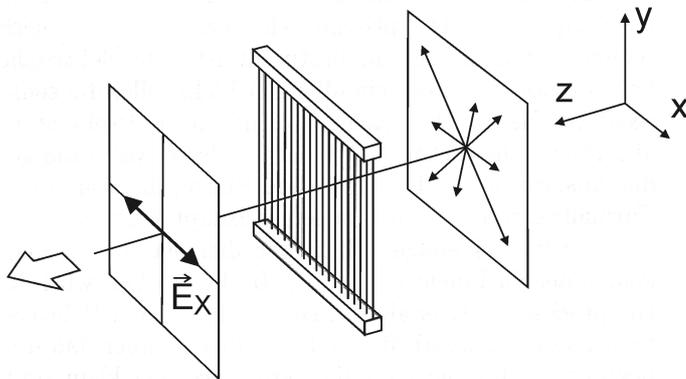


Abbildung 5: Polarisation von Mikrowellen durch einen Drahtgitterpolarisator (nach Hecht 1989).

Die Komponente des elektrischen Feldes, die parallel zu den Drähten des Drahtgitterpolarisators liegt, verrichtet Arbeit an den Leitungselektronen entlang der Längsrichtung eines jeden Drahtes und wird dadurch absorbiert. Die Elektronen übertragen dabei einen Teil ihrer Energie durch Stöße an das Metallgitter, ein anderer Teil wird wieder abgestrahlt. Der größte Teil der y -Komponente des elektrischen Feldes wird reflektiert und nur ein kleiner Teil wird tatsächlich in Wärme umgewandelt (Raith 1999).

Senkrecht zu den Drähten des Drahtgitterpolarisators können sich die Elektronen nicht bewegen, so dass diese Komponente des elektrischen Feldes nicht beeinflusst wird. Ein Drahtgitterpolarisator hat somit eine Achse, in deren Richtung die Komponente des elektrischen Feldes durchgelassen wird. Diese Achse wird als Durchlassachse und die dazu senkrecht liegende Achse als Absorptionsachse bezeichnet. Die Durchlassachse des Gitters steht somit senkrecht zu den Drähten.

Das molekulare Analogon zum Drahtgitterpolarisator für Mikrowellen ist ein Polarisationsfilter für Licht. Das Polarisationsfilter ist über das gesamte sichtbare Spektrum ein wirksamer Polarisator, allerdings ist sein Effekt etwas schwächer im blauen Bereich des Spektrums (Hecht 1989). Ähnlich wie eine Anordnung von parallelen Drähten auf Mikrowellen wirkt, wirkt ein Polarisationsfilter auf Licht. Das Polarisationsfilter besteht aus einer Plastikfolie, deren Kohlenwasserstoffketten in eine Richtung gestreckt sind. Dadurch entsteht eine starke Ausrichtung der Moleküle. Die Plastikfolie wird in eine jodhaltige Lösung getaucht, wodurch sich Jod an die Kohlenwasserstoffketten bindet. Das Jod stellt die Leitungselektronen zur Verfügung, die sich entlang der Ketten, aber nicht senkrecht dazu bewegen können. Ähnlich wie bei dem Drahtgitterpolarisator treibt auch hier die Komponente des elektrischen Feldes, die parallel zu den Kohlenwasserstoffketten liegt, die Elektronen entlang der Polymerketten an und durchdringt das Polarisationsfilter nicht. Die dazu senkrechte Komponente geht fast ungeschwächt hindurch. Demzufolge hat ein Polarisationsfilter ebenfalls eine Achse, die als bevorzugte Durchlassrichtung bezeichnet werden kann und eine Achse, die senkrecht dazu liegt und als Absorptionsachse bezeichnet wird. Eine Anordnung, in der zwei Polarisationsfilter übereinander liegen, so dass ihre Durchlassachsen einen Winkel von 90° bilden, bezeichnet man als gekreuzt. Durch diese spezielle Anordnung der Polarisationsfilter tritt kein Licht hindurch (siehe Abbildung 6).

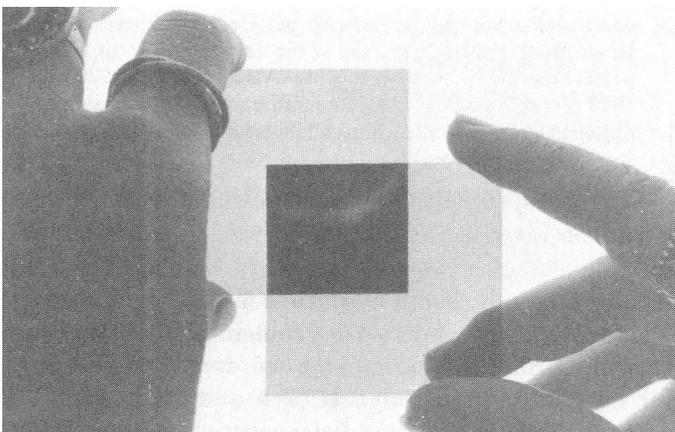


Abbildung 6: Foto von gekreuzten Polarisationsfiltern (Hecht 1989).

3.1.2.2 Polarisation durch Streuung

Wenn eine ebene, linear polarisierte elektromagnetische Welle auf ein Atom oder Molekül, zum Beispiel ein Luftmolekül trifft, dann induziert die einfallende Welle Schwingungen im Atom, die parallel zum elektrischen Feld der einfallenden Welle ausgerichtet sind. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, verhalten sich die Elektronen des Atoms wie ein elektrischer Dipol und strahlen die aufgenommene Energie wieder ab. In Abbildung 7 sind verschiedene Ausbreitungsrichtungen des gestreuten Lichts sowohl in der x - y -Ebene als auch in der y - z -Ebene dargestellt. Die Ausrichtung des jeweiligen elektrischen Feldes der Streustrahlung folgt dem oszillierenden Dipol. Das bedeutet, dass der elektrische Feldvektor der einfallenden Strahlung, die Bewegungsachse des Dipols und der elektrische Feldvektor der Streustrahlung in einer Ebene liegen.

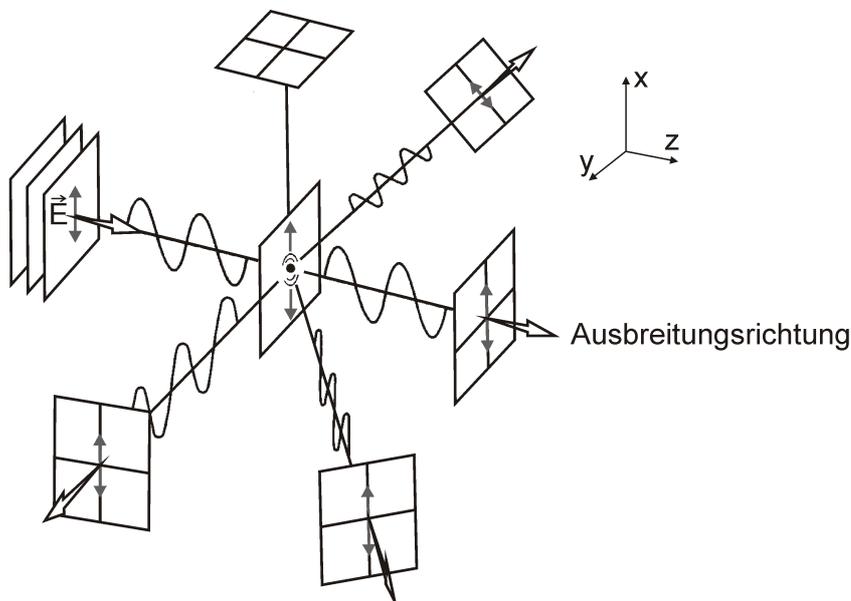


Abbildung 7: Streuung von linear polarisiertem Licht (nach Hecht 1989).

Ist das einfallende Licht unpolarisiert, so schwingen die Streuzentren in alle Richtungen des unpolarisierten Lichts und strahlen unter diesem Einfluss in alle Richtungen wieder ab, allerdings nicht in jede Richtung gleich stark (siehe Abbildung 8).

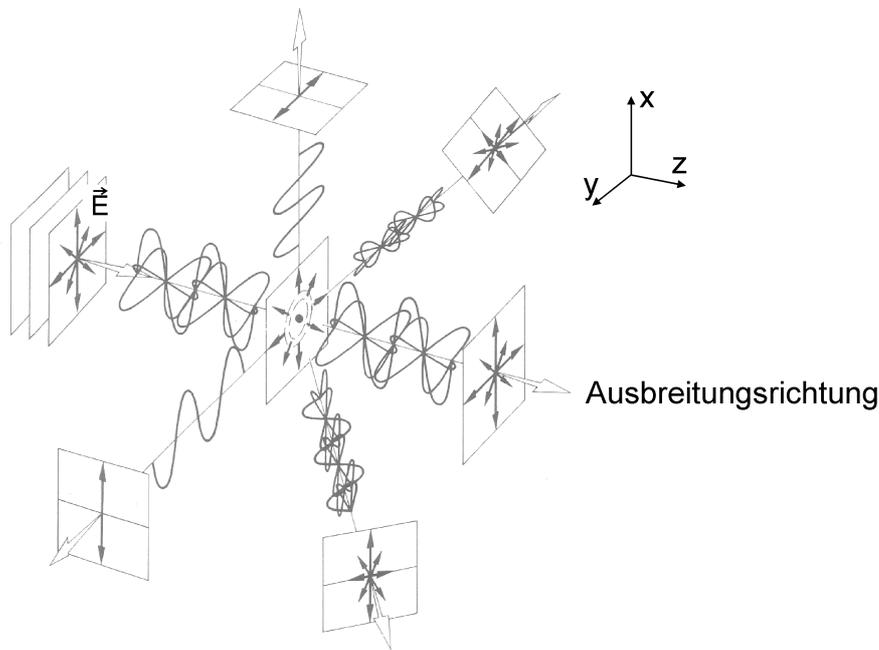


Abbildung 8: Streuung von unpolarisiertem Licht (nach Hecht 1989).

In Ausbreitungsrichtung (z -Achse) strahlen die Dipole das dem einfallenden Licht entsprechende unpolarisierte Licht ab. Ist die Richtung des gestreuten Lichts von der Ausbreitungsrichtung verschieden, so ist das Streulicht teilweise polarisiert. Der Anteil des linear polarisierten Lichts nimmt zu, wenn der Winkel zwischen der Richtung des gestreuten Lichts und der z -Achse zunimmt. Ist die Streurichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (x -Achse), so ist das gestreute Licht linear polarisiert (siehe Abbildung 8).

Die Polarisation von Licht durch Streuung wird in dem im Kapitel 5 vorgestellten Unterrichtsvorschlag am Beispiel der Polarisation des Sonnenlichts in der Atmosphäre beschrieben.

3.1.2.3 Polarisation durch Reflexion

Die Reflexion von Licht an dielektrischen durchsichtigen Materialien ist eine weitere Möglichkeit, polarisiertes Licht zu erzeugen. Beispielsweise sind die Reflexe von einer Fensterscheibe oder einer glatten Wasseroberfläche im Allgemeinen teilweise polarisiert wie es die Abbildung 9 schematisch zeigt.

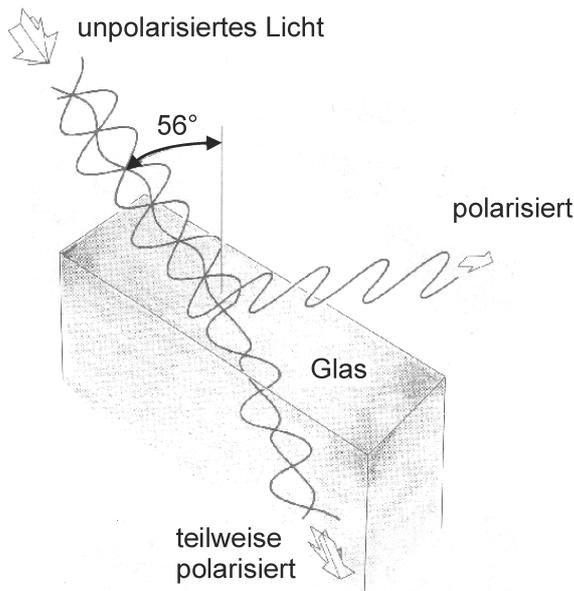


Abbildung 9: Polarisation von Licht bei der Reflexion an einer Glasoberfläche (nach Hecht 1989).

Der Polarisationsvorgang bei Reflexion kann ebenfalls mit Hilfe des elektrischen Dipolmodells beschrieben werden. Trifft eine ebene, linear polarisierte elektromagnetische Welle, deren elektrisches Feld senkrecht zur Einfallsebene liegt, auf eine dielektrische, durchsichtige Oberfläche, so wird die Welle an der Grenzfläche gebrochen und tritt unter einem Brechungswinkel θ_t in das Medium ein. Nach dem Hertzschen Dipolmodell regt das elektrische Feld der einfallenden Welle die gebundenen Elektronen senkrecht zur Einfallsebene an, so dass die Elektronen ihrerseits wieder abstrahlen. Ein Teil der wieder abgestrahlten Energie erscheint in Form der reflektierten Welle (siehe Abbildung 10).

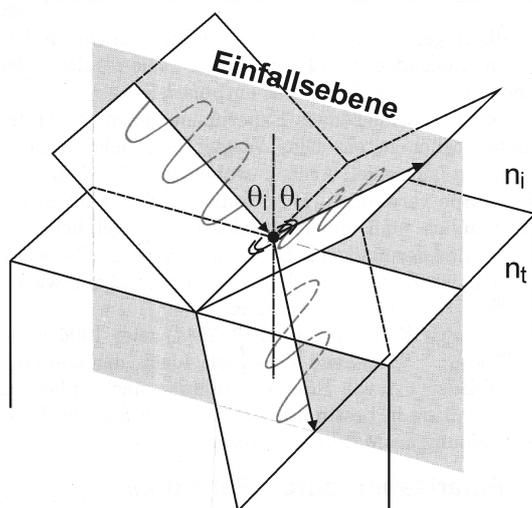


Abbildung 10: Elektronenoszillatoren bei Reflexion, elektrisches Feld senkrecht zur Einfallsebene (nach Hecht 1989).

In diesem Fall zeigen das Dipolstrahlungsbild und die Geometrie, dass genau wie die einfallende Welle sowohl die reflektierte als auch die gebrochene Welle senkrecht zur Einfallsebene linear polarisiert ist.

Liegt im Gegensatz hierzu das elektrische Feld der einfallenden elektromagnetischen Welle in der Einfallsebene, so schwingen die Elektronen in der Nähe der Oberfläche unter dem Einfluss der gebrochenen Welle (siehe Abbildung 11).

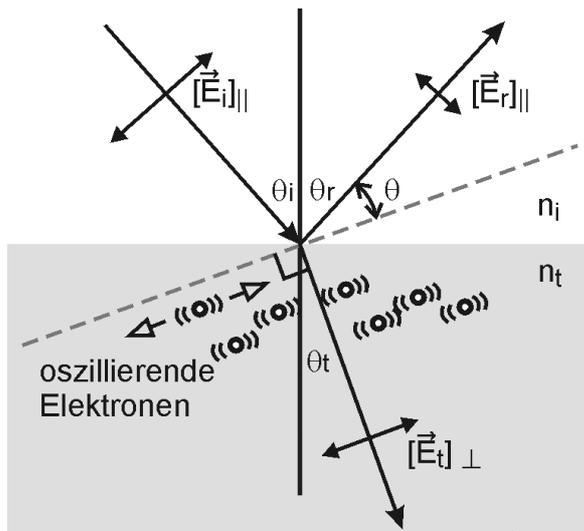


Abbildung 11: Elektronenoszillatoren bei Reflexion, elektrisches Feld parallel zur Einfallsebene (nach Hecht 1989).

Die Intensität der reflektierten Welle ist relativ klein, da die Richtung des reflektierten Lichts einen kleinen Winkel θ mit der Bewegungsrichtung des Dipols einschließt. In dem speziellen Fall, in dem $\theta = 0^\circ$ oder äquivalent dazu $\theta_i + \theta_r = 90^\circ$ ist, verschwindet die reflektierte Welle vollständig.

Im allgemeinen Fall wird bei der Reflexion von unpolarisiertem Licht unter diesen Bedingungen nur die Komponente reflektiert, die senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist. Der elektrische Feldvektor dieser reflektierten Welle liegt demnach parallel zur Oberfläche. Der spezielle Einfallswinkel, der diese Situation erzeugt, wird als Brewster-Winkel bezeichnet und beträgt bei der Reflexion an Glas 56° . Ist der Einfallswinkel verschieden vom Brewster-Winkel, so ist das reflektierte Licht teilweise polarisiert, wobei der Polarisationsgrad abhängig ist vom Einfallswinkel.

3.1.3 Interferenz von polarisiertem Licht

In diesem Abschnitt wird die Interferenz von polarisiertem Licht beschrieben. Diese Betrachtungen liefern die fachliche Grundlage für die Interferenzexperimente mit polarisiertem Licht, die im Unterrichtsvorschlag in Kapitel 5 mit Hilfe des Michelson-Interferometers durchgeführt werden. Zur Beschreibung der Interferenz werden die elektrischen Felder \vec{E}_1 und \vec{E}_2 zweier Lichtquellen betrachtet, die Wellen der gleichen Frequenz emittieren. \vec{E}_1 und \vec{E}_2 seien zunächst linear polarisiert und parallel zueinander. Die Bestrahlungsstärke I lässt sich durch den zeitlichen Mittelwert des Quadrates der elektrischen Feldstärke ausdrücken: $I = \langle \vec{E}^2 \rangle$. Für die sich überlagernden Felder \vec{E}_1 und \vec{E}_2 ergibt sich: $\vec{E}^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) = \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$. Wird auf beiden Seiten der Gleichung das zeitliche Mittel gebildet, so ergibt sich für die Bestrahlungsstärke: $I = I_1 + I_2 + I_{12}$. Der Term $I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$ wird als Interferenzterm bezeichnet. Für das obige Beispiel ergibt sich mit $\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1)$ und $\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2)$ für das zeitliche Mittel: $\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2)$. Daraus ergibt sich für den Interferenzterm $I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta$, wobei $\delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2)$ die Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen beschreibt. Ist die Polarisationsrichtung der beiden elektrischen Felder parallel zueinander, so reduziert sich der Interferenzterm zu $I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \cos \delta$. In diesem Fall wird der elektrische Feldvektor wie ein Skalar behandelt.

Für den Fall, dass die elektrischen Felder nicht parallel zueinander polarisiert sind, muss zur Berechnung des Interferenzterms das Skalarprodukt der beiden Vektoren \vec{E}_{01} und \vec{E}_{02} und somit der Winkel zwischen den Polarisationsrichtungen berücksichtigt werden. Falls \vec{E}_{01} und \vec{E}_{02} senkrecht aufeinander stehen, ergibt sich für den Interferenzterm $I_{12} = 0$, so dass kein Interferenzbild durch die beiden sich überlagernden elektrischen Felder entsteht.

Die oben dargestellten Gleichungen sind ebenso anwendbar für die Beschreibung der Interferenz zweier kohärenter Lichtquellen, die unpolarisiertes Licht emittieren. Liegen die Ausbreitungsvektoren der beiden elektrischen Felder in einer Ebene, so lässt sich jede beliebige Polarisationsrichtung nach der Komponentenzerlegung aus den Komponenten

darstellen, die parallel (\vec{E}_{\parallel}) bzw. senkrecht (\vec{E}_{\perp}) zu dieser Ebene sind. Jede ebene Welle kann dadurch in der Form ($\vec{E}_{\parallel} + \vec{E}_{\perp}$) dargestellt werden. Überlagert sich das Licht der beiden kohärenten Lichtquellen ($\vec{E}_{1\parallel} + \vec{E}_{1\perp}$) und ($\vec{E}_{2\parallel} + \vec{E}_{2\perp}$), so besteht das Interferenzmuster aus zwei unabhängigen sich genau überlagernden Interferenzmustern $\langle (\vec{E}_{1\parallel} + \vec{E}_{2\parallel})^2 \rangle$ und $\langle (\vec{E}_{1\perp} + \vec{E}_{2\perp})^2 \rangle$. Das bedeutet, dass sich bei beliebigen Polarisationsrichtungen immer die Anteile der elektrischen Felder überlagern, deren Komponenten parallel zueinander ausgerichtet sind (Hecht 1989).

3.1.4 Polarisation im Kursstrukturplan und in Schulbüchern

In den folgenden Abschnitten wird die Bedeutung und die Darstellung des Themas der Polarisation von Licht im Kursstrukturplan Hessens und in drei ausgewählten Schulbüchern vorgestellt. Der Kursstrukturplan Hessens ist exemplarisch für die Kursstrukturpläne bzw. Lehrpläne aller Bundesländer ausgewählt worden, weil er in Bezug auf die Inhalte der Optik im Wesentlichen mit denen aller Bundesländer übereinstimmt. Die Schulbücher sind dagegen gewählt worden, weil sie neueren Erscheinungsdatums und in den Bundesländern zugelassene und weit verbreitete Schulbücher sind.

3.1.4.1 Kursstrukturplan Hessen

Der Kursstrukturplan der gymnasialen Oberstufe (Hessisches Kultusministerium 1994) erwähnt das Thema der Polarisation von Licht nicht explizit als Unterrichtsinhalt. Allerdings könnte dieses Thema im Inhaltsbereich „Schwingungen und Wellen“ in den Jahrgangsstufen 12 bis 13 berücksichtigt werden. Behandelt werden dort die verschiedenartigen Phänomene von Schwingungen und Wellen innerhalb der Mechanik, bei der Ausbreitung elektromagnetischer Felder im Raum sowie die Wellennatur des Lichts und die Welleneigenschaften der Materie. Dabei soll die gleichartige Beschreibung dieser Phänomene aus unterschiedlichen Bereichen der Physik dargestellt werden, um gleiche Strukturen in verschiedenen Teilen der Natur zu verdeutlichen. Zu den verbindlichen Inhalten der Jahrgangsstufe 12 und 13 gehört, das Verhalten von Licht als transversale Welle beschreiben zu lernen. Allerdings fällt der Begriff der Polarisation im Kursstrukturplan weder bei den mechanischen Schwingungen noch bei der elektromagnetischen Welle.

3.1.4.2 Cornelsen Gesamtband Oberstufe Physik

Im Cornelsen „Gesamtband Oberstufe Physik“ (Boysen 1999) wird das Thema Polarisation von Licht im Kapitel „Optik“ unter der Überschrift „Weitere Lichtphänomene“ behandelt. Auf einer halben Seite werden Informationen zum linear polarisiertem Licht gegeben. Es wird über die Erzeugung von teilweise polarisiertem Licht durch Reflexion unter dem Brewster-Winkel und durch Streuung berichtet, allerdings ohne ein physikalisches Modell anzubieten, das die Polarisation durch die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie erklärt. Der Polarisationsfilter wird als Hilfsmittel benannt, mit dem polarisiertes Licht erkannt und hergestellt werden kann. Zur Wirkungsweise des Polarisationsfilters wird geschrieben: „Polarisationsfilter bestehen aus parallel angeordneten langkettigen Molekülen. Ihre Wirkungsweise kann man sich mit Bild 1 verdeutlichen: Eine Seilwelle, die in Richtung der Gitterstäbe schwingt, kann durch das Gitter gelangen; eine Seilwelle aber, deren Schwingungsebene quer zu den Gitterstäben liegt, wird durch das Gitter gestoppt.“ (Boysen 1999, S. 233). Dazu wird im Schulbuch das in Abbildung 12 dargestellte Bild gegeben, mit dem die Wirkungsweise des Polarisationsfilters verdeutlicht werden soll.

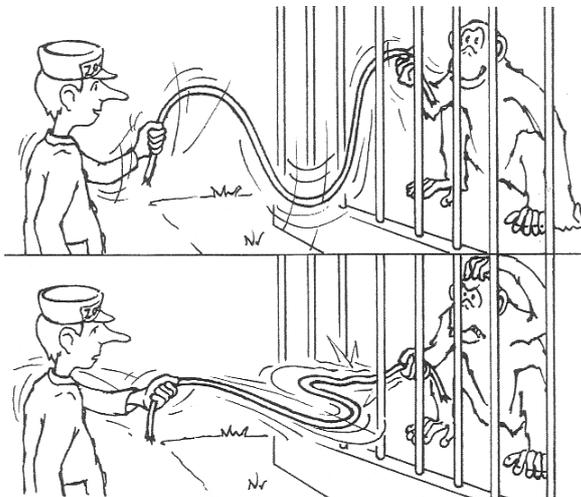


Abbildung 12: Analogie zwischen der Wirkungsweise eines Polarisationsfilters und einem Gitter im Schulbuch Cornelsen (Boysen 1999).

Diese Analogie benutzt eine physikalisch irreführende Vorstellung von der Wirkungsweise eines Polarisationsfilters, denn im Gegensatz zu der Abbildung passiert der Anteil des Lichts den Polarisationsfilter, dessen elektrischer Feldvektor senkrecht zu den parallel angeordneten langkettigen Molekülen schwingt (siehe Kapitel 3.1.2.1). Das linear polarisierte Licht verhält sich nicht wie die makroskopische mechanische Analogie der Seilwelle und schlüpft gerade nicht zwischen den „Gitterabständen“ des Polarisationsfilters hindurch. An dieser Stelle

könnte durch das Modell des oszillierenden Dipols eine bessere, physikalisch korrekte Anschauung geboten werden.

3.1.4.3 Kuhn Physik, Band II

Im Schulbuch „Physik, Band II“ vom Westermann Verlag (Kuhn 1998) wird die Polarisation des Lichts im Kapitel zur Wellentheorie des Lichts behandelt. Auch dieses Schulbuch benutzt die mechanische Analogie zur Erklärung der Polarisation von Licht durch einen Polarisationsfilter (siehe Abbildung 13).

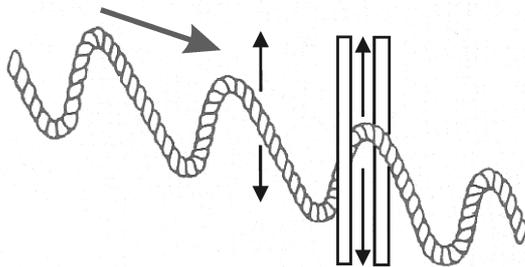


Abbildung 13: Analogie zwischen der Wirkungsweise eines Polarisationsfilters und Gitterstäben im Schulbuch von Kuhn (Kuhn 1998).

Als Erklärung für die Entstehung polarisierten Lichts wird folgender Text gegeben: „Wir können dies entsprechend dem mechanischen Beispiel unter der Annahme erklären, daß in dem von der Lampe kommenden Licht alle Schwingungsebenen vertreten sind. Der Polarisator filtert eine Ebene aus, den Rest absorbiert er. Der Analysator kann nun die polarisierte Welle restlos absorbieren. Die absorbierte Lichtenergie erwärmt die Filter.“ (Kuhn 1998, S. 364).²

Der Polarisationsfilter ist durchlässig für die Komponente aller Schwingungsrichtungen, die parallel zur Durchlassachse des Filters ist. Wenn der Polarisator, wie im Zitat beschrieben, nur eine Ebene herausfiltern würde, dann würden alle Schwingungsrichtungen des natürlichen Lichts bis auf eine den Polarisationsfilter durchdringen. Mit dem mechanischen Analogiemodell muss den Schülerinnen und Schülern der Versuch zur Polarisation von Mikrowellen, welcher 30 Seiten vorher im Buch behandelt wird, völlig unverständlich erscheinen. Denn dort wird zur Erklärung der Absorption von Mikrowellen die erzwungene Schwingung der

² Die physikalisch korrekte Wirkungsweise eines Polarisationsfilters wird in Kapitel 3.1.2.1 beschrieben und soll an dieser Stelle nicht thematisiert werden.

Elektronen im Drahtgitterpolarisator angegeben, wobei die Durchlassachse des Drahtgitterpolarisators im rechten Winkel zur Schwingungsebene der Mikrowellen dargestellt ist.

3.1.4.4 Metzler Physik

Im dritten hier vorgestellten Schulbuch vom Metzler Verlag (Grehn 1998) wird im Kapitel zur Polarisation von Licht bereits vorausgesetzt, dass elektromagnetische Wellen Transversalwellen sind. Diese Welleneigenschaften sollen mit Hilfe von Polarisationsfiltern auch bei Lichtwellen nachgewiesen werden. Auf einer halben Schulbuchseite wird mit Hilfe von Polarisationsfiltern gezeigt, dass Licht senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung eine Vorzugsrichtung besitzt. Daraus wird geschlossen, dass Licht sich nicht wie eine Longitudinalwelle verhält, sondern ein transversaler Wellenvorgang ist. Auf die Funktionsweise eines Polarisationsfilters wird nicht eingegangen. Allerdings wird zur Deutung der Polarisation von Licht mit Hilfe von Polarisationsfiltern wieder auf den mechanischen Analogieversuch verwiesen (siehe Abbildung 14), obwohl bei Versuchen zur Polarisation von Mikrowellen das Modell des Hertzschen Dipols zur Erklärung eingeführt wurde.

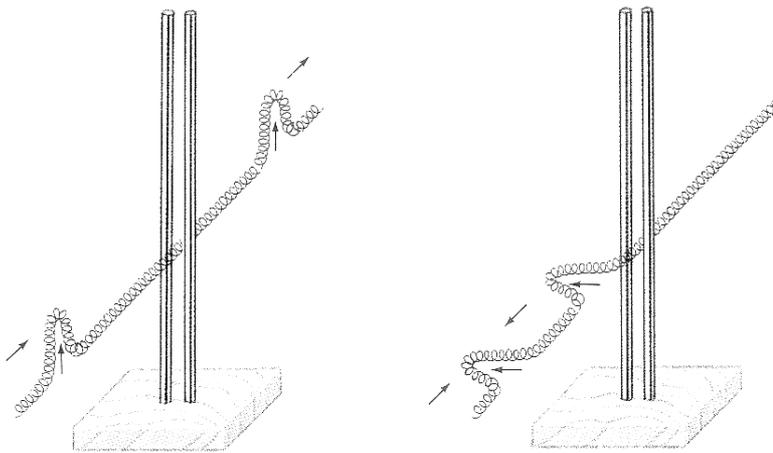


Abbildung 14: Analogie zwischen der Wirkungsweise eines Polarisationsfilters und Gitterstäben im Schulbuch Metzler Physik (Grehn 1998).

3.1.4.5 Zusammenfassung der Darstellung der Polarisierung im Kursstrukturplan und in Schulbüchern

In den drei hier vorgestellten Schulbüchern und im Kursstrukturplan des Landes Hessen spielt die Polarisierung von Licht als Inhalt für den Physikunterricht eine untergeordnete Rolle. Auf durchschnittlich einer Schulbuchseite wird die Beschreibung der Polarisierung als transversale Welleneigenschaft eingeführt. Weitere Experimente, wie zum Beispiel Polarisationsfarben oder Versuche mit Displays, werden zwar als technische Anwendung von polarisiertem Licht zum Teil angeführt, stehen aber meist ohne physikalische Erklärung bzw. Modellvorstellung zusammenhangslos im Text.

Alle drei Schulbücher versuchen, mit einer physikalisch falschen Analogievorstellung die Wirkungsweise des Polarisationsfilters als eine Art Gitter zu erklären, durch dessen „Stäbe“ eine Welle „hindurchschlüpft“. Obwohl in allen drei Schulbüchern die Polarisierung von Mikrowellen beschrieben wird, wird zwischen der Wirkungsweise des Drahtgitterpolarisators und des Polarisationsfilters kein Vergleich durchgeführt. Der Vorteil, dass durch den Drahtgitterpolarisator ein makroskopisches Modell des Polarisationsfilters vorliegt, wird nicht ausgenutzt. Eine weitere Schwierigkeit bei der Verwendung der Seilwellenanalgie liegt in der Annahme, dass nur eine Polarisationsrichtung den Polarisationsfilter passiert. Da die Schülerinnen und Schüler wissen sollten, dass unpolarisiertes Licht aus einer Vielzahl von Polarisationsrichtungen zusammengesetzt ist, ist es unverständlich, dass nur eine Polarisationsrichtung ungefähr die Hälfte der Intensität hinter dem Polarisationsfilter erzeugt.

Obwohl die Polarisierung neben der Frequenz und der Ausbreitungsrichtung eine der drei Grundeigenschaften des Lichts ist, mit denen das Verhalten von Licht vollständig beschrieben werden kann, wird, wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, der Polarisierung im Gegensatz zu den anderen beiden Eigenschaften, sowohl im Kursstrukturplan als auch in den Schulbüchern, wenig Bedeutung zuteil. Dies steht im Gegensatz zu ihrer historischen Bedeutung sowie ihrer Bedeutung auf der Ebene der Modellbeschreibung. Im folgenden Kapitel 3.1.5 wird dargestellt, dass die Polarisierung den entscheidenden Hinweis auf den transversalen Charakter der elektromagnetischen Welle lieferte. Das aus diesen Erkenntnissen entwickelte Wellenmodell wird in der gymnasialen Oberstufe als grundlegendes Modell zur Beschreibung von Licht verwendet. Weiterhin zeigt der in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtsvorschlag, dass das Thema der Polarisierung die Möglichkeit bietet, von der Beobachtung dieses Phänomens

ausgehend einen Unterrichtsgang zu entwickeln, der zu den abstrakten und anspruchsvollen Begriffen der Quantenphysik führt.

3.1.5 Historische Betrachtungen zur Polarisation

Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Abriss über den zeitlichen Verlauf der Entdeckung und Erforschung der Polarisation von Licht und deren Einbettung in die Geschichte der Physik des Lichts gegeben. Diese Betrachtungen sind auch für den Schulunterricht ein interessantes Thema, da durch die Entwicklung von Begriffen und Forschungsmethoden der naturwissenschaftliche Erkenntnisweg aufgezeigt werden kann. Ein Beispiel dafür ist die Bedeutung der Polarisation für die Beschreibung des Lichts, denn erst durch die Polarisationsexperimente wurde der Grundstein für die Beschreibung von Licht mit Hilfe der transversalen elektromagnetischen Welle gelegt.

Am Anfang stand das Phänomen der Doppelbrechung, das bereits im 17. Jahrhundert von dem dänischen Naturforscher Erasmus Bartholinus entdeckt wurde (Hecht 1989). Er untersuchte die optischen Eigenschaften des isländischen Feldspates und stellte dabei fest, dass das auf den Feldspat fallende Licht in zwei Strahlen aufgespalten wurde. Christiaan Huygens bemerkte bald darauf, dass diese zwei Strahlen zwei verschiedene Arten des Lichts darstellen. Wenn Huygens auch die Ansicht vertrat, dass Licht eine Wellennatur haben müsse, so hatte er allerdings nicht die Vorstellung von transversalen Wellen. Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts gab es zunächst keinen wesentlichen Fortschritt in der Entwicklung und Beschreibung auf diesem Gebiet.

Auf dem Weg zur heutigen Deutung der „zwei Arten“ des Lichts entdeckte 1808 Etienne Malus die Polarisation des Lichts durch Reflexion. Die Pariser Akademie hatte für eine mathematische Theorie der Doppelbrechung einen Preis ausgesetzt, woraufhin Malus dieses Problem untersuchte. Abends stand er am Fenster seines Hauses in Paris und untersuchte einen Kalkspatkristall. Die untergehende Sonne spiegelte sich in den Fenstern eines gegenüberliegenden Gebäudes. Malus blickte durch den Kalkspat auf das sich in den Fenstern reflektierende Licht der Sonne und entdeckte zu seinem Erstaunen, dass eines der Doppelbilder beim Drehen des Kalkspates verschwand. Nachdem die Sonne untergegangen war, setzte er seine Untersuchungen fort und verifizierte seine Beobachtungen mit Kerzenlicht, das an Wasser- und Glasoberflächen reflektiert wurde (Hecht 1989). Malus bezeichnete dieses Phänomen als Polarisation, wobei er seine Beobachtungen nicht in Verbindung zu transversalen Lichtwellen sah.

Der schottische Physiker David Brewster stellte bei ähnlichen Untersuchungen fest, dass unter einem bestimmten Einfallswinkel das an einer Oberfläche reflektierte Licht senkrecht zur Einfallsebene vollständig linear polarisiert ist (Hoepppe 1999). Bei dem nach ihm benannten Einfallswinkel, dem Brewster-Winkel, schließen der gebrochene und der reflektierte Lichtstrahl einen Winkel von 90° ein. Nach diesen Entdeckungen, die alle einen Hinweis auf den transversalen Wellencharakter des Lichts gaben, wurden eine Reihe von weiteren Untersuchungen von verschiedenen Forschern im Zusammenhang mit polarisiertem Licht durchgeführt. Erst zwölf Jahre nach der Entdeckung von Etienne Malus konnte eine umfassende Theorie der Polarisation von Augustin Fresnel aufgestellt werden, in der das Licht als eine Art transversaler Schwingung dargestellt wurde (Hoepppe 1999). In einer Reihe von Versuchen wies Thomas Young diese transversale Wellennatur des Lichts experimentell nach. Vor diesem Hintergrund erkannte James Clerk Maxwell in Verbindung mit den Experimenten von Oersted, Ampère und Faraday den Zusammenhang von Elektrizität, Magnetismus und Optik. Auf der Grundlage der transversalen elektromagnetischen Welle entwickelte Maxwell 1865 die Theorie zum Elektromagnetismus.

3.2 Fachlicher Hintergrund zur Quantenphysik

In diesem Kapitel wird die Sachstruktur der quantenphysikalischen Begriffe und Prinzipien dargestellt, die in dem in Kapitel 5 vorgestellten Unterrichtsvorschlag als zentrale Begriffe für eine Einführung in die Quantenphysik herausgearbeitet werden. Das Niveau dieser Darstellung sollte es einer Lehrkraft ermöglichen, sich einen fachlichen Überblick über die Inhalte zu verschaffen. Für ein tiefergehendes Studium sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. Fick 1988). Weiterhin wird eine Übersicht über die Bedeutung und Darstellung der Quantenphysik im Kursstrukturplan der gymnasialen Oberstufe sowie in drei ausgewählten Schulbüchern gegeben. Abschließend wird ein kurzer Überblick über die historische Entwicklung der Quantenphysik dargestellt.

3.2.1 Der quantenmechanische Zustand

In der klassischen Physik ist der Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert durch einen Punkt im Phasenraum. Dabei können die Werte der dem System zugehörigen Größen und dynamischen Variablen prinzipiell alle gleichzeitig bestimmt werden. In der Quantentheorie stellt sich diese Beziehung zwischen Zustand und dynamischer Variable

nicht so dar. Dort entspricht jedem physikalischen Zustand eines Systems zu einer bestimmten Zeit einem bestimmten ket-Vektor $|\Psi\rangle$. Diese Entsprechung ist derart, dass wenn sich ein physikalischer Zustand aus der Überlagerung anderer Zustände ergibt, sich der ket-Vektor als Linearkombination der anderen ket-Vektoren darstellen lässt. Dabei besteht zwischen dem Vektorraum, dessen Elemente die ket-Vektoren sind, und den Messgrößen kein unmittelbarer Zusammenhang. Wird dieser Vektorraum durch beliebige Basisvektoren $|v_k\rangle$ aufgespannt, so kann der Zustandsvektor $|\Psi\rangle$ nach diesen Basisvektoren zerlegt werden: $|\Psi\rangle = \sum_k |v_k\rangle \langle v_k | \Psi \rangle$, wobei die Komponenten $\Psi(k)$ des Vektors $|\Psi\rangle$ bezüglich der $|v_k\rangle$ die Skalarprodukte $\Psi(k) = \langle v_k | \Psi \rangle$ sind. Dieser abstrakte und vieldimensionale Vektorraum, dessen Elemente Zustandsvektoren sind, wird als Hilbertraum bezeichnet. Er dient als ein Verknüpfungsgebilde zwischen den Zustandsvektoren, in dem die Überlagerung der einzelnen Zustände mit Hilfe der Vektoraddition mathematisch ausgedrückt werden kann (Fick 1988).

In dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtskonzept werden als quantenphysikalische Objekte polarisierte Photonen betrachtet. Durch die Betrachtung polarisierter Photonen wird aus dem Zustandsvektor $|\Psi\rangle$ als Element des Hilbertraumes ein ebener Ortsvektor $\vec{u} = |u\rangle$ im zweidimensionalen Vektorraum. Das Skalarprodukt zweier Vektoren wird in eckigen Klammern dargestellt, die als „bracket“ bezeichnet werden: $\vec{u} \circ \vec{v} = \langle u | v \rangle$. Im Allgemeinen sind die Skalarprodukte in der Quantenmechanik komplexe Zahlen, so dass das Kommutativgesetz $\langle u | v \rangle = \langle v | u \rangle$ nicht gilt. Ein Vorteil des in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtskonzeptes besteht darin, dass bei dem Zugang zu quantenphysikalischen Begriffen mit Hilfe von linear polarisierten Polarisationszuständen auf komplexe Zahlen verzichtet werden kann. Der Grund dafür liegt darin, dass die linearen Polarisationszustände durch reelle, kommutative Skalarprodukte dargestellt werden können. Die Linearkombination des Vektors $|u\rangle$ ergibt sich dann im zweidimensionalen Vektorraum aus den Basisvektoren $|e_1\rangle$ und $|e_2\rangle$ zu: $|u\rangle = |e_1\rangle \cdot \langle e_1 | u \rangle + |e_2\rangle \cdot \langle e_2 | u \rangle$.

Verändert ein quantenphysikalisches Objekt seinen Zustand aufgrund einer Wechselwirkung, so ändert sich auch sein Zustandsvektor $|\Psi\rangle$. Diese Veränderung des Zustandes $|\Psi\rangle$ wird durch eine lineare Abbildung auf einen anderen Zustand $|\xi\rangle$ beschrieben: $\mathbf{A} : |\Psi\rangle \rightarrow |\xi\rangle$. Allgemein lässt sich der Übergang von einem Zustand in einen anderen Zustand mathematisch

durch die Anwendung von Operatoren \mathbf{A} erreichen. Ein Operator ist im Bereich der Zustandsfunktionen formal identisch mit einer Matrix im Bereich der Vektoren. Multipliziert man eine Matrix mit einem Vektor, so ist das Ergebnis wieder ein Vektor. Analog ordnet im Bereich der Zustandsfunktionen ein linearer Operator \mathbf{A} einer Zustandsfunktion $\Psi(k)$ eine neue Zustandsfunktion $\varphi(k)$ zu: $\varphi(k) = \mathbf{A}\Psi(k)$. Die Zustandsänderung von polarisierten Photonen durch die Wechselwirkung mit einem Polarisationsfilter, die im Unterrichtskonzept in Kapitel 5 thematisiert wird, kann durch die linearen Vektorabbildungen $\mathbf{A}: |u\rangle \rightarrow |v\rangle$ der

Vektoren $|u\rangle = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ auf die Vektoren $|v\rangle = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$ in einer Ebene beschrieben werden. In der

Form eines Gleichungssystems ergibt sich: $v_1 = a_1 \cdot u_1 + b_1 \cdot u_2$ und $v_2 = a_2 \cdot u_1 + b_2 \cdot u_2$,

wodurch die Abbildung \mathbf{A} durch die vier Zahlen a_1 , a_2 , b_1 und b_2 festgelegt ist. Die

Abbildung \mathbf{A} wird allerdings meistens nicht in Form eines Gleichungssystems angegeben,

sondern in Matrixform: $\mathbf{A} : \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$.

In Bezug auf die in Kapitel 5 beschriebenen Polarisationsexperimente stellt der Polarisationsfilter einen linearen Operator \mathbf{P} dar, der einen Polarisationszustand $|u\rangle$ auf einen anderen Polarisationszustand $|v\rangle$ abbildet: $\mathbf{P}: |u\rangle \rightarrow |v\rangle$. Der neue Polarisationszustand $|v\rangle$ wird bestimmt, in dem $|u\rangle$ auf die vorgegebene Richtung der Durchlassachse des Polarisationsfilters projiziert wird. Dieser Vorgang wird als Messung bezeichnet und kann allgemein als Projektion eines gegebenen Zustandes auf einen anderen Zustandsvektor aufgefasst werden. In diesem speziellen Fall ist es eine Projektion von Ortsvektoren in einer Ebene (siehe Abbildung 15).

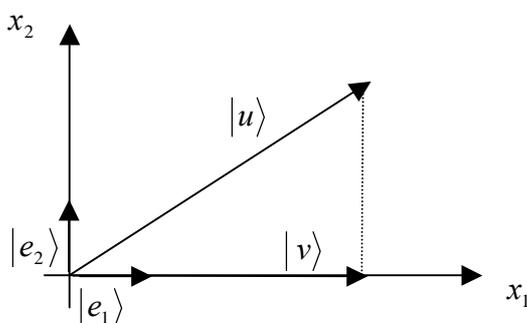


Abbildung 15: Darstellung der Projektion \mathbf{P} (nach Salm 1999).

Projiziert man den Vektor $|u\rangle$ auf die x_1 - bzw. x_2 -Achse, so bedeutet das, dass man den zweiten bzw. den ersten Summanden der Linearkombination $|u\rangle = |e_1\rangle \cdot \langle e_1|u\rangle + |e_2\rangle \cdot \langle e_2|u\rangle$ null setzt. Daraus ergibt sich für die Projektion: $\mathbf{P}_1 = |e_1\rangle \cdot \langle e_1|$ und $\mathbf{P}_2 = |e_2\rangle \cdot \langle e_2|$. Der projizierte Vektor $|v\rangle$ hat im Allgemeinen eine andere Richtung als der Urvektor $|u\rangle$. Es gibt nur zwei ausgezeichnete Richtungen, bei denen Ur- und Bildvektor zueinander parallel stehen. Diese beiden Richtungen sind gegeben durch die Basisvektoren $|e_1\rangle$ und $|e_2\rangle$. Die beiden Basisvektoren $|e_1\rangle$ und $|e_2\rangle$ sind damit Eigenvektoren der Abbildung \mathbf{P}_1 bzw. \mathbf{P}_2 . Für \mathbf{P}_1 ergeben sich daraus die Eigenwertgleichungen $\mathbf{P}_1|e_1\rangle = 1 \cdot |e_1\rangle$ und $\mathbf{P}_1|e_2\rangle = 0 \cdot |e_2\rangle$. Die Zahlen 1 und 0 in der Eigenwertgleichung werden als Eigenwerte von \mathbf{P}_1 bezeichnet. Eine anschauliche Vorstellung, wie einem Photon eine Polarisationsrichtung eingeprägt wird, ist mit dieser Schreibweise allerdings nicht verbunden.

Der ursprüngliche Polarisationszustand und damit der Informationsgehalt wird durch die Projektion „reduziert“. Der Messvorgang, der das Photon zwangsläufig verändert, macht es einem Beobachter unmöglich das Photon so zu beobachten, wie es „ist“. Bezüglich einer weiteren Messung, in der die Durchlassachse des Polarisationsfilters identisch ist, bleibt der Polarisationszustand erhalten. Allerdings ist der durch eine solche Messung erworbene Informationsgehalt gleich null.

Diese Darstellung des quantenphysikalischen Polarisationszustandes geht in wesentlichen Teilen auf einen Elementarisierungsansatz von Wolfgang Salm (Salm 1999) zurück.

3.2.2 Die Wahrscheinlichkeit

Das Verhalten eines Quantenobjektes bei der Messung kann mathematisch beschrieben werden mit Hilfe der Statistik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Führt man dieselbe Messung einer physikalischen Größe unter denselben Anfangsbedingungen mehrmals (n -mal) durch und erhält man dabei n_Λ -mal einen Messwert Λ , so wird der Quotient aus n_Λ/n als relative Häufigkeit bezeichnet. In langen Versuchsreihen mit sehr vielen Messungen ergibt sich die Wahrscheinlichkeit des Messwertes Λ zu: $W_\Lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_\Lambda}{n}$. Dabei ist $0 \leq W_\Lambda \leq 1$ (Fick 1988).

Beim Durchgang von Photonen mit identischem Polarisationszustand durch einen Polarisationsfilter werden einige Photonen absorbiert. Die durchgehenden Photonen sind in Richtung der Durchlassachse des Polarisationsfilters polarisiert. Obwohl alle Photonen vor der Messung in demselben Polarisationszustand waren, verhalten sie sich beim Durchgang durch den Polarisationsfilter nicht alle gleich. Darüber, ob ein Photon absorbiert wird oder nicht, lassen sich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Da man über das Verhalten einzelner Photonen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen kann, ist der Polarisationszustand eines einzelnen Photons nur in Zusammenhang mit einer definierten Messung sinnvoll. Die Frage, in welchem Polarisationszustand sich ein einzelnes Photon befindet, kann nicht beantwortet werden. Allerdings kann die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Photon in einer bestimmten Versuchsanordnung einen Polarisationsfilter durchdringt oder nicht durchdringt, bestimmt werden (Salm 1999).

3.2.3 Die Wahrscheinlichkeitsamplitude

Für ein Quantenobjekt kann der Übergang von einem bestimmten Anfangszustand $|\Psi_1\rangle$ in einen bestimmten Endzustand $|\Psi_2\rangle$ innerhalb einer bestimmten Versuchsanordnung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit W beschrieben werden. In der Dirac-Notation wird dieser Übergang durch das „bracket“ ausgedrückt, das von hinten nach vorne gelesen wird: $\langle\Psi_2|\Psi_1\rangle$.

Interferenzexperimente mit Quantenobjekten (z.B. Elektronen oder Photonen) lassen sich nicht durch einfache mathematische Operationen mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit erhalten, da die Wahrscheinlichkeit stets als reelle positive Größe definiert ist. Die Lösung dieses Problems lieferte Max Born, in dem er die Wahrscheinlichkeiten auf komplexe Zahlen zurückführte, die als Wahrscheinlichkeitsamplituden bezeichnet werden. In Analogie zur Ausbreitung von Wellen kann der Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeitsamplitude und Wahrscheinlichkeit veranschaulicht werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich im Fall der Wahrscheinlichkeitsamplituden um mathematische Wellen handelt und nicht etwa um reale Wellen. Im Fall der Überlagerung zweier Wellen wird die Interferenzfigur beschrieben durch den Phasenunterschied und durch die Addition der momentanen Amplituden der elektrischen Feldvektoren. In Analogie zu den Wellen werden für Quantenobjekte Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ_1 und Ψ_2 eingeführt, deren Überlagerung durch $\Psi_{12} = \Psi_1 + \Psi_2$ ausgedrückt werden kann. Damit gehorchen die Wahrscheinlichkeits-

amplituden genau wie die elektrischen Feldvektoren dem Superpositionsprinzip. Ebenfalls in Analogie zu realen Wellen, deren Intensität proportional zum Quadrat der Amplitude des elektrischen Feldvektors ist, wird auch dieser quadratische Zusammenhang auf die Wahrscheinlichkeitsamplitude und Wahrscheinlichkeit übertragen. Das Betragsquadrat der Wahrscheinlichkeitsamplitude wird somit als Maß für die Wahrscheinlichkeit gedeutet.

Ist $dW(\vec{r})$ die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt im Volumenelement dV um den Punkt \vec{r} zu finden, dann gilt: $dW(\vec{r}) = dW(x,y,z) = |\Psi(x,y,z)|^2 dV$. Die Größe $\bar{W} = |\Psi(x,y,z)|^2$ wird als Wahrscheinlichkeitsdichte bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt in einem endlichen Volumen ΔV zu finden, ist $W = \int_{\Delta V} dW = \int_{\Delta V} |\Psi(x,y,z)|^2 dV$.

In Bezug auf die Wahrscheinlichkeitsamplituden wird im Unterrichtsvorschlag in Kapitel 5 eine Vereinfachung des oben beschriebenen Formalismus vorgenommen. In dem Unterrichtsvorschlag bezieht sich die Wahrscheinlichkeitsamplitude $\Psi(\vec{r})$ nicht auf einen Raumpunkt, sondern auf ein sehr kleines Volumenelement ΔV um einen Punkt \vec{r} . Die Wahrscheinlichkeitsamplitude $\Psi(\vec{r}, \Delta V)$ gibt somit die Beschreibung, ein Quantenobjekt in einem sehr kleinen Volumen um \vec{r} zu registrieren. Der Zusammenhang dieser beiden Wahrscheinlichkeitsamplituden $\Psi(\vec{r}, \Delta V)$ und $\Psi(\vec{r})$ ist gegeben durch die Definition: $\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Psi(\vec{r}, \Delta V)}{\sqrt{\Delta V}} = \Psi(\vec{r})$.

Diese Grenzwertbildung gleicht in der Mechanik dem Übergang von einer diskreten Massenverteilung zu einer kontinuierlichen Dichte. In der Integralform lautet diese

Beziehung: $\Psi(\vec{r}, \Delta V) = \frac{1}{\sqrt{\Delta V}} \int_{\Delta V} \Psi(\vec{r}) dV$. Wenn sich die Wahrscheinlichkeitsamplitude $\Psi(\vec{r})$

im Volumen ΔV um \vec{r} wenig oder gar nicht ändert, so ergibt sich aus der Integralform: $\Psi(\vec{r}, \Delta V) \approx \Psi(\vec{r}) \sqrt{\Delta V}$. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt im sehr kleinen Volumen ΔV um \vec{r} zu registrieren, gegeben durch: $W(\vec{r}, \Delta V) = |\Psi(\vec{r}, \Delta V)|^2$ (Brachner 1977).

3.2.4 Fundamentalprinzip

In ihrem Buch für Lehrkräfte stellen Brachner und Fichtner (Brachner 1977) eine Formulierung des quantenmechanischen Fundamentalprinzips vor, die in dieser Arbeit als Grundlage für eine weitere Elementarisierung für das in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtskonzept benutzt wird. Sie geht auf Ideen von Richard Feynman zurück und beschreibt den Zusammenhang

zwischen der Beobachtungsmöglichkeit von Mikroobjekten und deren Fähigkeit zur Interferenz. Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Punkte dieser Formulierung zusammengefasst wiedergegeben.

Anhand des Doppelspaltexperiments mit Elektronen wird versucht die Frage zu klären, durch welchen der beiden Spalte ein Elektron auf dem Weg von der Quelle zum Schirm hindurchkommt. Im Doppelspaltexperiment ohne Ortsmessung an den Spalten ist Interferenz zu beobachten, allerdings kann nicht bestimmt werden, durch welchen Spalt ein Elektron gegangen ist. Hält man einen der beiden Spalte geschlossen, weiß man zwar, durch welchen Spalt die Elektronen gekommen sind, die Verteilung auf dem Schirm zeigt allerdings kein Interferenzmuster. Eine andere Form der Ortsmessung stellt die Beobachtung der Elektronen mit Hilfe von Licht dar. Die Spalte werden beleuchtet, so dass sich das Licht an den Elektronen streut (siehe Abbildung 16). Allerdings zeigt auch dieses Doppelspaltexperiment mit Ortsmessung an den Spalten, dass kein Interferenzbild vorhanden ist. Offensichtlich hat die Messung, durch welchen Spalt die Elektronen gegangen sind, das Interferenzmuster zerstört. Dies führt zu dem Schluss, dass das Interferenzmuster nur vorhanden ist, wenn nicht entschieden werden kann, durch welchen der Spalte das Elektron gekommen ist.

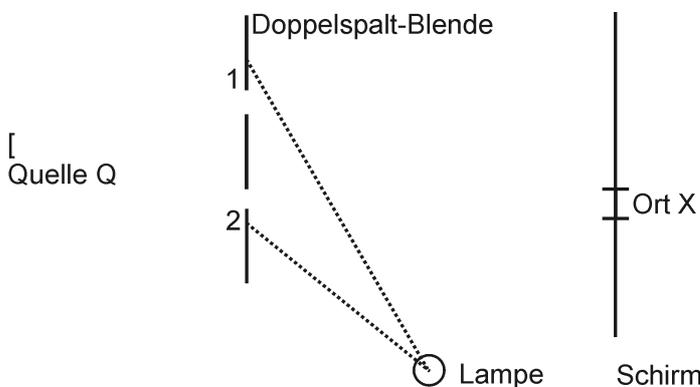


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Doppelspaltexperiments mit Ortsmessung (nach Fichtner 1980).

Mathematisch kann das quantenmechanische Fundamentalprinzip mit Hilfe der Dirac-Notation durch die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichten formuliert werden. Die Wahrscheinlichkeitsdichte \bar{W} im Doppelspaltexperiment ohne Ortsmessung, ein Elektron auf dem Schirm zu detektieren, ergibt sich aus den beiden Wahrscheinlichkeitsamplituden $\Psi_1 = \langle X|U|1\rangle\langle 1|U|Q\rangle$ und $\Psi_2 = \langle X|U|2\rangle\langle 2|U|Q\rangle$ zu:

$\bar{W}_{ohne} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\langle X|U|1\rangle\langle 1|U|Q\rangle + \langle X|U|2\rangle\langle 2|U|Q\rangle|^2$. Die „brackets“ sind von rechts nach links zu lesen und beschreiben die beiden Wege, die ein Elektron von der Quelle Q

(Anfangszustand) über die Spalte 1 bzw. 2 des Doppelspalt es hin zu einer Stelle X (Endzustand) auf dem Schirm nehmen kann. Der Buchstabe U in der Mitte der brackets deutet an, dass sich in diesem Fall das Elektron vom Anfangszustand in den Endzustand durch den leeren Raum bewegt. $\Psi_1 = \langle X|U|1\rangle\langle 1|U|Q\rangle$ und $\Psi_2 = \langle X|U|2\rangle\langle 2|U|Q\rangle$ sind die Wahrscheinlichkeitsamplituden, die die einzelnen, gedanklich unterschiedenen Wege darstellen. Aus der Sicht des Fundamentalprinzips sind die Wahrscheinlichkeitsamplituden bemerkenswert, denn im Falle ununterscheidbarer Wege im Doppelspaltexperiment kann den Elektronen kein Zustand zugewiesen werden, der mit „Elektron am linken Spalt“ oder „Elektron am rechten Spalt“ charakterisiert ist. Allerdings setzt sich die resultierende Wahrscheinlichkeitsamplitude aus den Wahrscheinlichkeitsamplituden zusammen, die zu den jeweiligen Wegen „Elektron am linken Spalt“ und „Elektron am rechten Spalt“ gehören. Die Addition von Ψ_1 und Ψ_2 macht sozusagen die Unterscheidung wieder rückgängig, so dass die resultierende Wahrscheinlichkeitsamplitude nicht mehr „Weg 1 oder Weg 2“ ausdrückt. In diesem Fall tritt im Experiment Interferenz auf.

Im Doppelspaltexperiment mit Ortsmessung sind die beiden Wege „Elektron am linken Spalt“ und „Elektron am rechten Spalt“ nicht mehr nur begrifflich sondern auch real unterschieden. Im Experiment ist durch diese Lokalisation keine Interferenz mehr zu beobachten. Die Intensitätsverteilung auf dem Schirm sieht so aus, als ob die Elektronen jeweils durch einen Spalt hindurchgehen, ohne dass der andere Spalt vorhanden wäre. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen einzelnen Spalt ist $\bar{W} = |\Psi|^2$, wodurch sich die Gesamtwahrscheinlichkeitsdichte für das Doppelspaltexperiment mit Ortsmessung durch: $\bar{W} = \bar{W}_1 + \bar{W}_2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 = |\langle X|U|1\rangle\langle 1|U|Q\rangle|^2 + |\langle X|U|2\rangle\langle 2|U|Q\rangle|^2$ ergibt.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich folgende Formulierung des quantenmechanischen Fundamentalprinzips:

Gibt es – klassisch betrachtet – i verschiedene Möglichkeiten (Wege) $|Q\rangle \rightarrow |i\rangle \rightarrow |X\rangle$ für das Eintreten eines Ereignisses und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich eine bestimmte Möglichkeit i_0 gewählt wurde, so ist die Wahrscheinlichkeitsdichte für dieses Ereignis $\bar{W} = \left| \sum_i \Psi_i \right|^2$, wobei die Ψ_i die Wahrscheinlichkeitsamplituden für i verschiedene Wege sind. Dann tritt immer Interferenz auf.

Hinterlässt dagegen jedes Ereignis an der Versuchsanordnung eindeutig ein bestimmtes Merkmal, durch das entschieden werden kann, welche Möglichkeit i_0 der i verschiedenen Möglichkeiten gewählt wurde, so ist die Wahrscheinlichkeitsdichte $\overline{W} = \sum_i |\psi_i|^2$. Dabei tritt nie Interferenz auf (nach Brachner 1977, S. 92).

Das Fundamentalprinzip beschreibt zwei wesentlich verschiedene Experimente in der Quantenphysik, die sich dadurch unterscheiden, ob tatsächlich entschieden ist, dass die eine oder andere Alternative gewählt wird, oder ob es sich nur um eine gedankliche Unterscheidung handelt. Dieses Prinzip beschreibt das Wesen aller quantenphysikalischer Phänomene und wird in dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtskonzept nach einem Vorschlag von Brachner und Fichtner (Brachner 1977) als Demonstrationsexperiment am Michelson-Interferometer auf eine konkrete Situation angewandt.

3.2.5 Quantenphysik im Kursstrukturplan und in Schulbüchern

In den folgenden Abschnitten werden die Bedeutung und die Darstellung des Themas Quantenphysik im Kursstrukturplan Hessens und in drei ausgewählten Schulbüchern vorgestellt. Genau wie im Kapitel 3.1.4 ist der Kursstrukturplan Hessens exemplarisch für Kursstrukturpläne bzw. Lehrpläne anderer Bundesländer ausgewählt worden, weil er mit diesen im Wesentlichen übereinstimmt. Die Schulbücher sind gewählt worden, weil sie neueren Erscheinungsdatums und in den Bundesländern zugelassene und weit verbreitete Schulbücher sind.

3.2.5.1 Kursstrukturplan Hessen

Zum Thema Quantenphysik zählt der Kursstrukturplan der gymnasialen Oberstufe (Hessisches Kultusministerium 1996) unter der Überschrift „Atom- und Kernphysik“ einige Inhalte auf, die verbindlich für die Jahrgangsstufen 12 bis 13 sind. Ziel dieses Inhaltsbereiches ist es, die Bedeutung von Modellvorstellungen über den Aufbau und die Struktur der Materie zu verstehen, die historische Entwicklung des Atomkonzeptes und die Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe in der Quantenphysik zu erkennen. Zu den Inhalten gehören unter anderem das Photonenmodell des Lichts, die Untersuchung von Spektren, das Bohrsche Atommodell, die Wellenstruktur der Materie und die Radioaktivität. Bei den verbindlichen Inhalten stehen die Vorstellungen vom Atom im Vordergrund.

3.2.5.2 Cornelsen Oberstufe Physik

In dem Schulbuch Cornelsen Oberstufe Physik (Boysen 1999) werden im Kapitel „Quanten, Atome, Kerne“ auf 82 Seiten Inhalte zur Quantenphysik behandelt, wobei die Darstellung der Inhalte ähnlich angeordnet ist wie im Kursstrukturplan. Zunächst wird im Kapitel „Lichtquanten und Elektronenwellen“ auf den Teilchenaspekt des Lichts und den Wellencharakter der Elektronen eingegangen, in dem speziell die Experimente Photoeffekt, Comptoneffekt und Streuversuche mit Elektronen vorgestellt werden. Anhand des Doppelspaltexperiments mit Elektronen wird das statistische Verhalten eines Quantenobjekts nur kurz ohne einen mathematischen Formalismus mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdeutung eingeführt. Das Dilemma, dass sich Mikroobjekte weder wie Wellen noch wie Teilchen verhalten, wird durch die Einführung der Ψ -Funktion gelöst, aus der sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Mikroobjektes berechnen lässt. Die Begründung, mit der die Wellenfunktion eingeführt wird, lautet im Schulbuchtext wie folgt: „In der Quantentheorie ordnet man den Elektronen eine Wellenfunktion zu, die Ψ -Funktion (Psi-Funktion). Diese Funktion ordnet jeder Stelle des Raums x eine Zahl zu. Ähnlich wie man bei genauer Kenntnis der Lichtwelle das Interferenzmuster hinter dem Doppelspalt berechnen kann, kann man aus der Wellenfunktion des Elektrons das Wahrscheinlichkeitsdiagramm für die Elektronenstrahlinterferenzen ermitteln.“ (Boysen 1999, S. 316). Im Anschluss wird die Heisenbergsche Unschärferelation dargestellt.

Das folgende Kapitel „Atomphysik“ gibt eine Einführung in die Atomvorstellung und stellt verschiedene Anwendungen des Lasers vor. Am Ende dieses Kapitels werden auf vier Schulbuchseiten Fragestellungen der Quantenphilosophie diskutiert, in denen es um die Realität in der Quantenphysik und die Nichtlokalität von Quantenobjekten geht. Im Anschluss folgen Kapitel zur Radioaktivität, zur Kernphysik und zur Elementarteilchenphysik.

3.2.5.3 Kuhn Physik, Band II

Im Schulbuch Kuhn Physik aus dem Westermann Verlag (Kuhn 1998) wird dem Thema Quantenphysik auf 69 Seiten im Kapitel „Quanten und Atome“ der größte Raum von den hier vorgestellten Schulbüchern zur Verfügung gestellt. Ähnlich wie in den anderen Schulbüchern geht es in den ersten Kapiteln zunächst um die Quanteneffekte der elektromagnetischen Strahlung und um die quantenhafte Emission und Absorption bei atomaren Systemen. Im Anschluss daran werden verschiedene Atommodelle vorgestellt. Weiterführend wird im Kapitel über die Wellenstruktur der Materie die Heisenbergsche Unschärferelation und die

damit verbundene Lokalisierung von Mikroobjekten behandelt. Im Unterschied zu den anderen Schulbüchern wird im Kapitel „Elektronen in Kraftfeldern“ tiefer auf die Grundgedanken der Wellenmechanik eingegangen. Dabei wird die eindimensionale zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung entwickelt und die Deutung der Ψ -Funktion in der statistischen Interpretation gegeben. Ein weiterer Unterschied zu den anderen Schulbüchern besteht darin, dass der quantenphysikalische Messprozess in einem eigenen Kapitel behandelt wird, in dem auch der quantenphysikalische Zustandsbegriff thematisiert wird. In einem ebenfalls eigenständigen Kapitel werden die Interpretationsprobleme der Quantenphysik behandelt, wobei nicht nur die Kopenhagener Interpretation vorgestellt wird, sondern auch neuere Experimente diskutiert werden.

3.2.5.4 Metzler Physik

Im Schulbuch Metzler Physik (Grehn 1998) werden in einem 26 Seiten umfassenden Kapitel „Einführung in die Quantenphysik“ zu Beginn die experimentellen Grundlagen zur Lichtquantenhypothese mit Hilfe der Versuche zum Photo- und Comptoneffekt dargestellt. Der Begriff der Wahrscheinlichkeit wird am Doppelspaltexperiment mit Licht eingeführt. Die Dichte der pro Flächenelement absorbierten Photonen ist proportional zur Intensität und damit auch proportional zum Quadrat der Amplitude der Welle. Mit Hilfe der Wellenvorstellung wird über die Registrierung eines Photons eine Aussage getroffen, in dem gesagt wird, dass „... an den Stellen im Interferenzbild, an denen sich nach dem Wellenbild die größte Intensität ergeben soll, auch die Wahrscheinlichkeit am größten (ist), ein Photon zu registrieren.“ (Grehn 1998, S. 374). Die Wahrscheinlichkeit ist proportional zu der auf eine bestimmte Fläche treffende Intensität und damit ist sie auch proportional zum Amplitudenquadrat. Diese Deutung wird als Verbindung der beiden Vorstellungen über das Licht angesehen, denn mit Hilfe der Aussagen über Wellen gewinnt man Wahrscheinlichkeitsaussagen über Photonen. Im daran anschließenden Abschnitt wird gezeigt, dass auch Materieteilchen wie Elektronen Welleneigenschaften besitzen. Das Verhalten der Elektronen am Doppelspalt wird beschrieben durch eine Wellenfunktion, deren Amplitudenquadrat proportional zur Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen ist.

Im Kapitel „Quantenphysik und klassische Physik“ wird die Wellenfunktion als komplexe Funktion bezeichnet, deren reellwertiges Quadrat des Betrages zu deuten versucht wird. Die Amplitude der Wellenfunktion wird hier als Wahrscheinlichkeitsamplitude bezeichnet, deren Betragsquadrat proportional zur Wahrscheinlichkeit ist. Im abschließenden Kapitel der

„Einführung in die Quantenphysik“ folgt die Erläuterung des Unschärfeprinzips und eine Diskussion über die daraus entstehenden Grenzen der Begriffe der klassischen Physik in Bezug auf den Ort und den Impuls eines Teilchens.

3.2.5.5 Zusammenfassung der Darstellung der Quantenphysik im Kursstrukturplan und in Schulbüchern

Das Thema Quantenphysik in der Oberstufe nimmt in den hier vorgestellten Schulbüchern genau wie der Kursstrukturplan einen großen zeitlichen und inhaltlichen Raum ein. Die Fülle an Themen in den Schulbüchern erfordert für den Unterricht eine Auswahl, die exemplarisch für eine Darstellung der Quantenphysik behandelt werden kann. Dabei werden zum Teil sehr anspruchsvolle Inhalte im Schulbuch thematisiert, die weit über das Niveau eines Physikunterrichts in der gymnasialen Oberstufe hinausgehen und eher an Inhalte aus dem Physik-Vordiplom erinnern. Der mathematische Anspruch, der für das Verständnis des quantenmechanischen Formalismus und der grundlegenden Prinzipien vorausgesetzt wird, ist in allen drei Schulbüchern sehr hoch. Mit diesem Anspruch werden Schülerinnen und Schüler eines Physik-Grundkurses Schwierigkeiten in der Bearbeitung dieser Themen haben. In den meisten Fällen führen Gedankenexperimente von Versuchen, die nur schwer oder gar nicht im Schulunterricht durchzuführen sind, zu den Begriffen und Prinzipien der Quantenphysik.

Im Gegensatz zu der Fülle von möglichen Themen im Kursstrukturplan und in den Schulbüchern zeigt der in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtsvorschlag einen Elementarisierungsansatz auf, der in wenige, allerdings grundlegende quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien einführt, die die Grundzüge der Quantenphysik beschreiben. Anhand von zunächst real durchführbaren Polarisationsexperimenten wird ein Übergang von der klassischen Beschreibung des Lichts hin zu einer quantenphysikalischen Beschreibung erarbeitet. Auf einen schwierigen quantenphysikalischen Formalismus und ein hohes mathematisches Niveau kann durch den Vektorcharakter des elektrischen Feldvektors, der die Polarisationsexperimente beschreibt, verzichtet werden. Auch wenn der Unterrichtsgang nicht dem geschichtlichen Erkenntnisweg der Quantenphysik folgt (siehe Kapitel 3.2.6), so werden einige quantenphysikalischen Begriffe ähnlich wie in der historischen Entwicklung dieser Begriffe durch Analogieschlüsse eingeführt. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist die Analogie zwischen elektrischem Feldvektor und Wahrscheinlichkeitsamplitude sowie deren quadratischer Zusammenhang.

3.2.6 Historische Betrachtungen zur Quantenphysik

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Quantentheorie gegeben. Dieser historische Abriss ist nicht vollständig, und es werden lediglich die wichtigsten Stationen und Personen erwähnt, die für den Fortschritt der Quantentheorie von Bedeutung waren. Diese Betrachtungen sind auch für den Schulunterricht ein interessantes Thema, da durch die Deutung des „neuen“ quantenphysikalischen Verhaltens der naturwissenschaftliche Erkenntnisweg aufgezeigt werden kann.

Um 1900 wurde für die Beschreibung einiger Experimente zur Schwarzkörperstrahlung eine Theorie neuen Typs nötig, wodurch sich zwangsläufig auch eine neue Deutung der Vorgänge im atomaren Bereich ergab. Max Planck veröffentlichte 1900 seine Ideen zur Beschreibung der Schwarzkörperstrahlung, in denen er eine Quantisierung der Energie annahm. Nach seiner Vorstellung sollte die Energie der Oszillatoren der schwarzen Strahlung diskrete Werte annehmen. Planck führte zur Beschreibung der Energiequantelung die Konstante h ein, von der er annahm, dass sie zu den fundamentalen Naturkonstanten gehöre (Hund 1996). Dabei hat Planck nicht an eine Quantennatur der Strahlung selbst gedacht. Dass Licht aus Energiequanten besteht, wurde 1905 von Albert Einstein formuliert, allerdings wurde diese Entdeckung erst Anfang der 20er Jahre ernst genommen. Mit dieser Annahme beschrieb Einstein die Wechselwirkung zwischen der Emission von Elektronen und Licht, die 1902 völlig unerwartet experimentell gefunden wurde. Nach Einsteins Resultaten hat elektromagnetische Strahlung sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften.

In den ersten zwei Jahrzehnten des 20sten Jahrhunderts ist die Frage nach dem Wesen des Lichts sowohl im Zusammenhang mit dem Grundproblem der Quantentheorie als auch als eigenständiges Problem untersucht worden. Die Entdeckung des Comptoneffekts, der zeigt, dass die Streuung von Licht an Elektronen sich nach den Stoßgesetzen von Teilchen verhält, brachte 1923 den endgültigen Durchbruch der Lichtquantenhypothese. Interferenzexperimente weisen auf die Wellennatur des Lichts hin, hingegen spricht der Photoeffekt zugunsten des Teilchencharakters des Lichts. Diesen Dualismus von Welle und Teilchen übertrug Louis Victor Prince de Broglie 1924 auf Elektronen und andere Mikroobjekte, in dem er diesen Objekten eine Wellenlänge zuordnete (Simonyi 1995).

Noch deutlicher wurde der Erfolg der Quantentheorie in der theoretischen Beschreibung der Atome. Dort zeigten sich diskrete Werte im Linienspektrum der Atome. Auf der Grundlage der Theorie des Planckschen Wirkungsquantums entwickelte Nils Bohr 1913 eine Atomtheorie, die bis heute als das Bohrsche Atommodell in Physiklehrbüchern benutzt wird. Die

Leistung dieses Modells ist, dass es die Existenz der diskreten Energieniveaus der Elektronen, die um einen positiven Kern „kreisen“, beschreiben kann. Die „klassische“ Bohrsche Atomtheorie wurde weiterentwickelt mit der Ergänzung weiterer, die Quantenzustände charakterisierenden Quantenzahlen und dem Ausschließungsprinzip, das 1925 von Pauli formuliert wurde.

In der Zeit, in der die Bohrsche Theorie große Erfolge verbuchen konnte, sind auch die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit immer offensichtlicher geworden. Unvollständigkeiten haben sich zumeist darin gezeigt, dass die aus dem Bohrschen Modell folgenden Aussagen in der Regel korrigiert werden mussten, um zu einer befriedigenden Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen kommen zu können. Werner Heisenberg erkannte als grundlegenden Mangel der Bohrschen Theorie, dass die Emission der diskreten Frequenzen bei Übergängen zwischen wohldefinierten Elektronenbahnen durch Begriffe der klassischen Physik beschrieben wurde. Da diese klassischen Elektronenbahnen in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit messbaren Größen stehen, versuchte Heisenberg eine Quantenmechanik analog zur klassischen Mechanik auszubilden, in der Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen vorkommen (Baumann 1986). Dies führte Heisenberg zusammen mit Born und Jordan zur mathematischen Formulierung der Matrizenmechanik. Die Unbestimmtheitsrelation, die Werner Heisenberg 1927 formulierte und die für ihn den Ausgangspunkt zur Deutung der Quantentheorie bildet, spielt auch heute noch in den meisten Lehrbüchern eine zentrale Rolle. Heisenberg hat erkannt, dass der Messprozess ein wesentlicher Bestandteil der quantenmechanischen Beschreibung der Wirklichkeit ist.

Etwa gleichzeitig mit Heisenberg, dessen Ideen von Teilcheneigenschaften der Materie ausgingen, kam Erwin Schrödinger zu einer Grundgleichung ganz anderer Art, ausgehend von den Welleneigenschaften der Materie. Schrödinger führte über die durch Wellenfunktionen beschriebenen Zustände eine äquivalente Formulierung der Quantenmechanik ein. Allerdings blieb zunächst die anschauliche Bedeutung der Wellenfunktion Ψ unklar. Die Deutung des Absolutquadrates der Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsdichte, eine heute noch akzeptierte Interpretation der Wellenmechanik, lieferte Max Born.

Mit der „Matrizenmechanik“ von Heisenberg und der „Wellenmechanik“ von Schrödinger gab es zwei äquivalente mathematische Formulierungen der Quantenmechanik. Mit einer axiomatischen Formulierung der Quantentheorie mit Hilfe einer Operator Darstellung im Hilbertraum wurde von Paul Adrian Maurice Dirac zusammen mit Ernst Jordan ein weiterer Schritt zur Entwicklung der Quantentheorie geleistet (Simonyi 1995).

4 Thematisch angrenzende Unterrichtskonzepte

Bevor in Kapitel 5 die eigenen Ideen für eine Einführung in das Thema der Quantenphysik beschrieben werden, soll in Kapitel 4.2 der aktuelle Stand der didaktischen Diskussion zu diesem Thema dargestellt werden. Der in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtsvorschlag führt auf der Grundlage der Polarisations-eigenschaft des Lichtes, die innerhalb eines kontextorientierten und fächerübergreifenden Zusammenhangs eingeführt wird, hin zu einer Beschreibung quantenphysikalischer Begriffe und Prinzipien. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel nicht nur die Quantenphysik berücksichtigt, sondern auch die Polarisation von Licht und ihre Behandlung im Schulunterricht. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt allerdings in der Darstellung verschiedener Ansätze zur Einführung in die Quantenphysik. In Kapitel 4.3 wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept beschrieben, das dem in Kapitel 5 vorgestellten Unterrichtsvorschlag zugrunde liegt. Bei der Darstellung der einzelnen Konzepte wurde versucht, den inhaltlichen Aufbau zusammenfassend wiederzugeben. Abschließend wird in Kapitel 4.4 eine Bewertung der verschiedenen Unterrichtskonzepte durchgeführt.

4.1 Unterrichtskonzepte zur Polarisation

Um die Darstellung der Polarisation von Licht, so wie sie im Unterrichtsvorschlag in Kapitel 5 gegeben ist, einordnen zu können, werden in diesem Abschnitt zwei verschiedene Ansätze aufgezeigt. Zum einen wird eine kurze Darstellung der Polarisation auf der Grundlage der Wellentheorie gegeben. Zum anderen wird ein modellfreier Ansatz zur Beschreibung der Polarisation vorgestellt.

4.1.1 Polarisation und Wellenmodell

Polarisation von Licht wird traditionell im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe im Rahmen des Wellenmodells eingeführt. Üblicherweise werden zur Herstellung und zum Nachweis polarisierten Lichts Polarisationsfilter verwendet. Der Entstehungsprozess des polarisierten Lichts bei der Wechselwirkung zwischen unpolarisiertem Licht und Polarisationsfolie kann mit Hilfe des Hertzschens Dipolmodells beschrieben werden. Die Wechselwirkung

zwischen Licht und Polarisationsfolie kann durch das makroskopische Analogon eines Drahtgitterpolarisators bei der Erzeugung von polarisierten Mikrowellen veranschaulicht werden. Dagegen wird in Schulbüchern die Wirkungsweise eines Polarisationsfilters auf unpolarisiertes Licht häufig mit einem Seil verglichen, das entlang zweier Gitterstäbe in einer Ebene geführt wird. Die Problematik dieser Vorstellung wurde in Kapitel 3.1.4 thematisiert. Als weitere Möglichkeit polarisiertes Licht zu erzeugen, werden die Reflexion von Licht an Glasplatten unter dem Brewster-Winkel und die Erzeugung von polarisiertem Licht durch Streuung behandelt. Allerdings wird auf eine Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie innerhalb des Wellenmodells verzichtet (siehe Kapitel 3.1.4). Zusätzlich zu der oben beschriebenen Vorgehensweise findet man in fachdidaktischen Zeitschriften eine Reihe von Vorschlägen für Experimente, bei denen polarisiertes Licht verwendet wird. Allerdings werden die meisten dieser oft technischen Anwendungen im Unterricht lediglich vorgestellt, ohne eine Beschreibung der physikalischen Ursachen zu geben. Zwei typische Beispiele dafür sind die Veröffentlichungen von Uwe Hennemann zur Stereophotographie (Hennemann 1999) und von Rainer Macdonald zur Funktionsweise von Flüssigkristalldisplays (Macdonald 1997).

4.1.2 Polarisation und modellfreie Optik

Eine andersartige Beschreibung der Polarisation wird innerhalb eines Curriculums, das sich den Hinweisen von R. Steiner für den Physikunterricht der Waldorfschule verpflichtet fühlt, von Johannes Grebe-Ellis gegeben (Grebe-Ellis 2002). Innerhalb einer modellfreien Beschreibung der Optik wird der Versuch unternommen, die Polarisation auf der Grundlage einer „hypothesenfreien Urteilsbildung“ auf dem Niveau eines Physikgrund- und Leistungskurses zu beschreiben. Hypothesenfrei bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zur Beschreibung der Polarisation keine Erklärungsmittel und -modelle herangezogen werden, die nicht mit der Erscheinung selbst gegeben sind. Das „Grundphänomen“ der Aufhellung und Abdunklung im Zusammenhang mit der Polarisation soll mit Hilfe der Durchsicht durch zwei sich gegeneinander drehenden Turmalinplatten erklärt werden. Die Beobachtung der Aufhellung und Abdunklung wird in drei verschiedenen Versuchen zur Erzeugung von polarisiertem Licht durchgeführt, woraus drei Bedingungen zur Beobachtung von polarisiertem Licht ermittelt werden. Zunächst werden in Versuchen mit Polarisationsfolien die für die Erzeugung des polarisierten Lichts verantwortlichen Eigenschaften der Folie in Zusammenhang mit dem zu beobachtenden Phänomen der Haidinger-Büschel gesetzt. Die Haidinger-Büschel werden als

ein Kontrastphänomen eingeführt, deren Ursache nicht erklärt wird. Der Aufbau der Polarisationsfolie und die daraus resultierende Ausrichtung der Figur der Haidinger-Büschel parallel zu der Streckrichtung der Polarisationsfolie wird als „Festkörperbedingung“ bezeichnet. Die „Festkörperbedingung“ beschreibt somit die Eigenschaft des Materials, das polarisiertes Licht erzeugen kann. Die Polarisationsrichtung des Lichts wird in weiteren Versuchen durch die Lage der Haidinger-Büschel beschrieben. In Versuchen zur Reflexion von Licht an dielektrischen Oberflächen werden „Standpunktbedingungen“ ermittelt, unter denen es einem Beobachter möglich ist, die „Oberflächenbüschel“, wie die Haidinger-Büschel jetzt bezeichnet werden, zu erkennen. Eine dritte Bedingung, die sogenannte „Umgebungsbedingung“, wird durch Betrachtung des blauen Himmels ermittelt. Die „Umgebungsbedingung“ berücksichtigt die Stellung, die der Beobachter bei der Betrachtung der „Atmosphärenbüschel“, wie die Haidinger-Büschel in diesem Fall genannt werden, einnimmt.

Im weiteren Verlauf wird nun versucht, die beobachtete Aufhellung und Abdunklung des Lichts beim Durchgang durch optische Mittel unabhängig von den erarbeiteten Bedingungen zu charakterisieren. Dazu wird die „Bildhelligkeit“ I eingeführt, die das durch zwei Polarisationsfilter gehende Licht auf einem Schirm erzeugt. Die Polarisationsrichtung wird in Abhängigkeit der zu beobachtenden Bildhelligkeit beschrieben. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Bildhelligkeit und der Orientierung der zwei Achsen der Polarisationsfilter ist der Ausgangspunkt für eine operationale Definition des sogenannten Polarisationszustandes als Bildzustand. Anhand des Bildzustandes, der eine bestimmte Helligkeit auf dem Schirm darstellt, wird lineares, elliptisches und zirkular polarisiertes Licht definiert. Beispielsweise wird linear polarisiertes Licht dadurch definiert, dass in einer bestimmten Stellung der Achsen der Polarisationsfilter zueinander der Schirm vollständig abgedunkelt ist. Zur Erklärung des zirkular und elliptisch polarisierten Lichts wird der Begriff des Transformators eingeführt, der die Wirkungsweise einer Folie (z.B. Frischhaltefolie) auf linear polarisiertes Licht hat. Allein anhand der Helligkeit des Bildzustandes in Abhängigkeit der Achsenstellung der Polarisationsfilter und der eingefügten Folie als Transformator wird das zirkular polarisierte Licht beschrieben. Die verschiedenen Bildzustände von linear, elliptisch und zirkular polarisiertem Licht werden geometrisch auf einer Einheitskugel (Poincaré-Kugel) dargestellt, wodurch der innere Zusammenhang zwischen den Bildzuständen und den damit verknüpften Beobachtungshandlungen gezeigt werden soll. Die mathematische Beschreibung der verschiedenen Bildzustände wird mit Hilfe der Stokes-Parameter und der Mueller-Matrizen durchgeführt. Die Stokes-Parameter S_0 , S_1 , S_2 , S_3 charakterisieren über die Bildhelligkeiten die Polarisations-eigenschaften des Lichts. Zu jedem Bildzustand können mit Hilfe der Geometrie

der Poincaré-Kugel die Stokes-Parameter berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen verschiedenen Bildzuständen und der Übergang von einem Bildzustand in einen anderen wird mit Hilfe von Mueller-Matrizen beschrieben. Die gesuchten Komponenten der Stokes-Parameter, die den neuen Bildzustand darstellen, werden durch eine lineare Abbildung zwischen den bekannten Stokes-Parametern und einer 4x4 Transformationsmatrix ermittelt. Bisher wurde keine Erprobung bzw. Evaluation dieses Vorschlags veröffentlicht.

4.2 Unterrichtskonzepte zur Einführung in die Quantenphysik

In diesem Abschnitt werden vier Unterrichtskonzepte bzw. Curricula zur Einführung in die Quantenphysik vorgestellt, die von verschiedenen fachdidaktischen Arbeitsgruppen in den letzten Jahren für den Einsatz im Physikunterricht entwickelt wurden. Das erste Unterrichtskonzept stammt von Hartmut Wiesner und richtet sich an Leistungskurschüler der gymnasialen Oberstufe. Als zweites Beispiel wird das „Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik“ von Rainer Müller vorgestellt, das als Fortführung des Quantenphysikkonzeptes von Wiesner angesehen werden kann. Eine weitere Alternative, das Thema Quantenphysik in der Schule zu unterrichten, bietet die „Berliner Konzeption zur Einführung in die Quantenphysik“, die in der Arbeitsgruppe von Helmut Fischler entwickelt wurde. Zum Schluss wird ein von Johannes Werner erarbeiteter Unterrichtsvorschlag vorgestellt, der innerhalb des Zeigerformalismus quantenphysikalisches Verhalten beschreibt.

4.2.1 Eine Einführung in die Quantentheorie für Leistungskurschüler

Hartmut Wiesner entwickelte für Leistungskurschüler eine Konzeption zur Einführung in die Quantentheorie, deren Ziel es ist, die begrifflichen Probleme durch einen quantenmechanisch korrekten, konventionellen Formalismus zu reduzieren (Wiesner 1992). Dieser formal sehr anspruchsvolle Ansatz wurde erstmals im Schuljahr 1990/91 erprobt und mit Hilfe von Leistungstests auf ihren Lernerfolg überprüft.

Die Vorbereitungen zur Einführung in die Quantentheorie finden bereits im Kurs zur Newtonschen Mechanik statt, wo über den Determinismus bzw. Indeterminismus der klassischen Mechanik diskutiert wird. Im Zusammenhang mit dieser Diskussion werden die grundlegenden statistischen Größen, wie Mittelwert, Streuung und Standardabweichung, Häufigkeitsverteilung bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilung, eingeführt. Zu den Minimal-

anforderungen an mathematischen Kenntnissen gehören komplexe Zahlen, das Differenzieren und Integrieren von Sinus- und Kosinus-Funktionen und das Differenzieren von komplexen Exponentialfunktionen.

Der Lehrgang zur Einführung in die Quantentheorie ist in insgesamt acht Unterrichtseinheiten unterteilt. In der ersten Einheit wird das für die Konzeption zentrale Element der Präparation auf Zustände eingeführt, das beschreibt, wann und wie sich Quantenobjekte in einem bestimmten Zustand befinden. In den folgenden Unterrichtseinheiten werden Quantenphänomene vorgestellt, die durch die Mikrostruktur des Lichts und die Eigenschaften von Elektronen entstehen. Die Deutung der Elektroneninterferenzbilder führt zu der Zustandsfunktion, mit der eine Gesamtheit von Elektronen, die auf einen bestimmten Impuls „präpariert“ sind, beschrieben werden kann. Der Impuls- bzw. der Energieoperator ergibt sich aus der Überlegung, dass eine auf die Zustandsfunktion angewandte mathematische Operation den Wert der physikalischen Größe anzeigt, den diese Funktion in einem bestimmten Zustand hat. Im Unterrichtsgespräch wird den Schülerinnen und Schülern vermittelt, dass die Quantentheorie nicht durch Verallgemeinerungen oder Änderungen der Newtonschen Mechanik abgeleitet werden kann, sondern eine neue Theorie ist, die „erraten“ werden muss, um sich dann zu bewähren. Der Übergang von der klassischen Mechanik in die Quantenmechanik soll bewusst als „harter Bruch“ vollzogen werden. Im Unterrichtsverlauf werden anschließend axiomatisch die Grundgesetze der Quantentheorie aufgestellt. Dazu gehören neben der Präparation von Gesamtheiten von Quantenobjekten, der Beschreibung eines Zustandes einer Gesamtheit durch die Zustandsfunktion und der Einführung in den Operatorformalismus auch das Superpositionsprinzip, das mit dem Beispiel des Doppelspaltversuchs mit Elektronen (Jönsson-Experiment) im Film gezeigt wird. Als letztes Axiom wird vorgegeben, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, ein Quantenobjekt in einem Intervall zwischen x und $x + dx$ zu finden, gegeben ist durch $|\Psi(x)|^2 dx$. In den darauf folgenden Unterrichtseinheiten werden Beispiele für die Berechnung von Eigenwerten und Eigenzuständen gegeben. Behandelt werden die Drehimpulskomponente L_z , das Modell des freien Elektronengases im Metallkristall und gebundene Elektronen im Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden. Danach werden Atomspektren untersucht und Spektrallinien bestimmt. Das Energietermschema wird den Schülerinnen und Schülern als empirisches Ergebnis vermittelt. Weiterführend wird die Stabilität des Grundzustandes des Wasserstoffatoms verdeutlicht, in dem die Schülerinnen und Schüler die exakte Zustandsfunktion und den Energieterm für den 1s-Zustand berechnen bzw. nachrechnen. Daran anschließend wird die Unschärferelation thematisiert. Den

Abschluss des Lehrgangs bildet eine Einheit, in der die Deutungsfragen der Quantenphysik diskutiert werden.

Der Lernerfolg dieses anspruchsvollen Kurses wurde von Wiesner mit Hilfe eines Tests und einer Klausur erhoben. Die Ergebnisse zeigen nach Meinung Wiesners, „...daß die Schüler des Erprobungskurses in einem erstaunlichen Umfang die im Unterricht angebotene quantenmechanische Sichtweise gelernt hatten.“ (Wiesner 1992, S. 289). Offensichtlich ist es gelungen, mit Hilfe dieses abstrakten Zugangs zur Quantentheorie den Schülerinnen und Schülern die Grundzüge der Quantenphysik näher zu bringen, ohne dazu auf eine Anschaulichkeit aus der klassischen Mechanik zurückgreifen zu müssen. Allerdings wurde das Leistungsvermögen des Physikleistungskurses als etwas über dem Durchschnitt liegend angegeben.

4.2.2 Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik

Das „Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik“ besteht aus zwei Teilen, die unterschiedliche Funktionen erfüllen und verschiedene Schwerpunkte setzen (Müller 2000). Der erste Teil, der als „qualitativer Basiskurs“ bezeichnet wird, legt seinen Schwerpunkt auf die begrifflichen Fragestellungen und die Deutungsfragen der Quantenphysik. Der daran anschließende „quantitative Aufbaukurs“ befasst sich mit Prinzipien des quantenmechanischen Formalismus und liefert damit einen Einblick in die formalen Strukturen der Quantenmechanik. Durch die Teilung des Konzeptes in zwei Kurse werden die zentralen Punkte des Unterrichtskonzeptes, wie die begrifflichen Grundlagen der Quantenmechanik und die Welle-Teilchen-Problematik, in einem spiralartigen Aufbau zweifach durchlaufen. Die Unterrichtsziele und die Ausgestaltung dieses Lehrgangs beruhen teilweise auf Vorarbeiten von Peter Engelhardt (Engelhardt 1994) und Hartmut Wiesner (Wiesner 1992).

Am Beginn des qualitativen Basiskurses erfolgt eine Einführung in die Quantenphysik in schulüblicher Weise über den Photoeffekt und den Photonenbegriff. Im weiteren Verlauf sollen die Aspekte der Quantenphysik herausgestellt werden, die das „ganz Neue“ gegenüber der klassischen Physik darstellen. Dazu werden die Begriffe erarbeitet, die nach Ansicht der Autoren ein „echtes Verständnis“ der quantenphysikalischen Phänomene ermöglichen, wie zum Beispiel der Begriff der Präparation, der an Beispielen aus der klassischen Mechanik und Optik eingeführt wird. Anhand von Interferenzexperimenten wird gezeigt, dass sich das Interferenzmuster sowohl mit einer Wellenvorstellung als auch mit einer Teilchenvorstellung deuten lässt. Weitere Experimente, die grundsätzliche Probleme der Quantenphysik

verdeutlichen, wie zum Beispiel das Lokalisationsproblem, werden als Computersimulation vorgeführt. Diese Betrachtungen führen zu dem Ergebnis, dass einem Photon die klassisch definierte Eigenschaft von Weg bzw. Ort unter Umständen nicht zugeschrieben werden kann. Im Anschluss daran wird die Deutung der statistischen Aussagen der Quantenphysik durch die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation thematisiert. Die Einführung in die statistischen Aussagen erfolgt durch das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen im Simulationsexperiment. Die Notwendigkeit einer statistischen Beschreibung soll durch den allmählichen Aufbau des Interferenzmusters durch einzelne Photonen deutlich werden. Das Ergebnis der Betrachtung ist die zuverlässige Vorhersage, an welchen Stellen viele Photonen und an welchen Stellen wenige Photonen nachgewiesen werden können. Allerdings kann keine Aussage getroffen werden, an welcher Stelle das einzelne Photon auftreffen wird. Diese Ergebnisse sollen die Notwendigkeit einsichtig machen, in der Quantenmechanik zu Wahrscheinlichkeitsaussagen überzugehen.

Der zweite Durchgang durch die spiralförmige Einführung in die Grundbegriffe der Quantenphysik beginnt mit dem Abschnitt „Elektronen als Quantenobjekte“. Dazu wird das wellentypische Verhalten der Elektronen in Simulationsexperimenten demonstriert und die de Broglie Beziehung durch Analogiebetrachtungen zu Photonen verdeutlicht. Mit Hilfe des Doppelspaltexperiments mit Elektronen werden die Begriffe der Wahrscheinlichkeitsverteilung und der Wellenfunktion eingeführt, die die Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x)$ bestimmt. Der Ausdruck $P(x) = |\Psi(x)|^2$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Quantenobjekt bei einer Messung am Ort x gefunden wird. Analog zu dem Interferometerversuch mit Photonen, in dem es um die Eigenschaften „Ort“ und „Weg“ geht, wird nun das Doppelspaltexperiment mit Elektronen gedeutet. Mit einem weiteren Simulationsprogramm zum quantenmechanischen Messprozess wird gezeigt, dass bei Festlegung der Ortseigenschaft das Interferenzmuster verschwindet. Im Vergleich zur klassischen Mechanik wird deutlich, dass es in der Quantenmechanik nicht möglich ist, zwei Eigenschaften eines Objektes gleichzeitig zu präparieren. Diese Überlegungen führen zu einer qualitativen Formulierung der Unbestimmtheitsrelation, die im Münchener Unterrichtskonzept folgendermaßen formuliert wird: „Es ist nicht möglich, ein Ensemble von Quantenobjekten gleichzeitig auf Ort und auf Impuls zu präparieren.“ (Müller 2000, S. 132). Für die quantitative Deutung der Unbestimmtheitsrelation werden Δx und Δp als Standardabweichung einer statistischen Verteilung verstanden.

Der zweite Teil des Münchener Unterrichtskonzeptes, der sich hauptsächlich an Leistungskurse richtet, soll Einblicke in die formale Struktur der Quantenmechanik vermitteln. Dabei soll auf die Einführung der komplexen Zahlen verzichtet werden. Zunächst wird die Wellenfunktion freier Elektronen behandelt, die durch Sinus- und Kosinusfunktionen beschrieben wird. Danach wird das Konzept des Operators eingeführt. Die Motivation für die Einführung liegt darin, dass es mit Hilfe des Operators der kinetischen Energie möglich ist, aus einer vorgegebenen Wellenfunktion den Wert der kinetischen Energie zu ermitteln. Anschließend werden Eigenwertgleichungen und die Schrödinger-Gleichung behandelt. Mit der Schrödinger-Gleichung als zentraler Gleichung der Quantenmechanik werden nun Anwendungen der Quantenmechanik in der Atomphysik betrachtet. Ein Beispiel dafür sind Elektronen in einem unendlich hohen eindimensionalen Potentialtopf.

Erste empirische Untersuchungen zum Lernerfolg des Münchener Unterrichtskonzeptes zur Quantenmechanik zeigen, dass die Schülerinnen und Schüler ein Grundverständnis über die Aussagen der Quantenphysik erlangt haben (Müller 2001).

4.2.3 Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“

Die Berliner Konzeption ist von einer Gruppe von Lehrern und Physikdidaktikern der Freien Universität Berlin erarbeitet worden. Der Schwerpunkt des Berliner Unterrichtskonzeptes zur Einführung in die Quantenphysik (Berg 1989) liegt auf den begrifflichen Fragestellungen der Quantenphysik. Das Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass Bezüge zur klassischen Physik weitgehend vermieden werden: „Das zentrale Ziel dieser Konzeption ist es, den Schülern das Verständnis der Grundprinzipien der Quantenphysik dadurch zu erleichtern, daß die beobachteten quantenphysikalischen Phänomene von Anfang an durch die Brille der modernen Physik betrachtet werden.“ (Fischler 1994, S 276).

Am Anfang des Berliner Konzeptes stehen im Gegensatz zu anderen Ansätzen, die den Einstieg über den Photoeffekt wählen, die Quantenerscheinungen von Elektronen. Die Begründung dafür wird darin gesehen, dass die Schülerinnen und Schüler dazu neigen, ein Modell aus der klassischen Physik in die Mikrowelt zu übertragen, und dadurch Photonen mit der Teilchenvorstellung verbinden. Aus diesem Grund werden Elektronen als Quantenobjekte am Anfang des Konzeptes behandelt, deren Verhalten nicht mit Begriffen aus der klassischen Physik beschrieben werden kann. Mit der Demonstration von Beugungserscheinungen in einer Elektronenbeugungsröhre, die dem Interferenzmuster mit Licht ähneln, soll die Vorstellung von einem Elektron als klassisches Teilchen verhindert werden. Dabei bezieht

sich der Wellencharakter lediglich auf das Bild der Interferenz und nicht auf das Objekt Elektron selbst. Bei reduzierter Intensität treffen die Elektronen stochastisch verteilt auf dem Schirm auf, woraus geschlossen wird, dass das Verhalten der Elektronen nicht mit einem Wellenvorgang in Verbindung gebracht werden kann. Die de Broglie-Wellenlänge bzw. die Materiewelle spielt in der Beschreibung der Elektroneninterferenz keine Rolle. Nach Meinung der Autoren würde der Begriff „Materiewelle“ nur zu einer Bildung von mechanischen Analogien führen. Ein Trickfilm zeigt im weiteren Verlauf des Unterrichtskonzeptes den Doppelspaltversuch zum einen mit klassischen Teilchen und zum anderen mit Elektronen. Die anschließende Diskussion soll ergeben, dass sich klassische Teilchen ganz anders verhalten als Elektronen. Daraus folgt, dass Elektronen nicht mit Begriffen der klassischen Physik beschreibbar sind. Elektronen sind weder Wellen noch Teilchen, sondern sie sind Quantenobjekte. Diese Ergebnisse am Doppelspalt sollen Anlass geben, den Bahnbegriff für Elektronen in Frage zu stellen. Als Weiterführung der Infragestellung des Bahnbegriffs bei Elektronen wird die Unbestimmtheitsrelation behandelt. Zu der Unbestimmtheitsrelation führt eine je-desto-Beziehung mit einer Ortseinschränkung Δx und einem dazugehörigen Querimpuls Δp_x : „Je mehr der Elektronenstrahl auf einen immer kleiner werdenden Ortsbereich Δx bestimmt wird, desto stärker tritt eine Impulsunbestimmtheit Δp_x quer zur ursprünglichen Impulsrichtung auf.“ (Fischler 1994, S. 279). Nach der Erörterung der je-desto-Beziehung wird die Unbestimmtheitsrelation lediglich mitgeteilt. Ein Übergang zur Betrachtung von Elektronen in Atomen ermöglicht die Vorstellung von Elektronen, die auf einen Bereich eingeschränkt sind. Als Vorbereitung auf die Energiequantelung im Wasserstoffatom wird an einem einfachen Potentialtopfmodell der eindimensionale Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden behandelt. Erst an dieser Stelle des Berliner Konzepts werden Photonen als Quantenobjekte mit Hilfe des Photoeffekts eingeführt und diskutiert. Dadurch, dass die Schülerinnen und Schüler das Photon an dieser Stelle als etwas Neuartiges kennen lernen, gehen sie mit dem Begriff „Quantenobjekt“ vorsichtiger um. Genau wie bei den Elektronen wird zunächst die statistische Betrachtungsweise der Photonen am Doppelspalt vorgenommen. Mit der Simulation des Taylor-Experiments am Computer wird das statistische Verhalten der Photonen gezeigt. Durch die statistische Deutung der Experimente, sowohl mit Elektronen als auch mit Photonen, soll eine dualistische Sprechweise vermieden werden. Anschließend wird mit dem Comptoneffekt als Simulationsexperiment die Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen gezeigt. Zum Abschluss des Berliner Unterrichtskonzeptes werden erkenntnistheoretische Aspekte der Quantenmechanik behandelt. Dazu

werden Originaltexte zur Deutungsdebatte der Quantenphysik bearbeitet und diskutiert, wobei die Kopenhagener Deutung und die Ensemble-Deutung im Vordergrund stehen.

Das Berliner Konzept wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleituntersuchung evaluiert (Lichtfeldt 1991), an der insgesamt 270 Schülerinnen und Schüler teilgenommen haben. Die Untersuchung zeigte, dass Schülerinnen und Schüler der Erprobungskurse gegenüber Schülerinnen und Schülern aus Kontrollkursen im Unterricht verstärkt quantenphysikalischen Erklärungsmuster benutzten und signifikant ausgeprägte Veränderungen ihrer Vorstellungen im Sinne der Quantenphysik hatten.

4.2.4 Zeigerformalismus und Quantenphysik

In der Dissertation „Vom Licht zum Atom“ von Johannes Werner (Werner 2000) wird ein Zugang zur Quantenphysik auf der Grundlage des Lichtwegkonzeptes vorgestellt. Dieser Ansatz hebt sich von den bereits vorgestellten Konzepten deutlich ab, da es keine tradierten Methoden und Modelle zur Einführung in die Quantenphysik verwendet. Das von Lutz Schön und Roger Erb (Erb & Schön 1997) entwickelte Lichtwegkonzept nutzt den Zeigerformalismus nach einer Idee von Richard Feynman (Feynman 1988) zur Beschreibung von Beugungs- und Interferenzphänomenen mit Licht. Das Lichtwegkonzept behandelt die Inhalte des Optikunterrichts von Mittel- und Oberstufe und schließt mit der Erarbeitung der Quanteneigenschaften des Lichtes in der Oberstufe ab. Als Weiterführung des Lichtwegkonzeptes wird in der Darstellung von Johannes Werner die Wechselwirkung von Licht und Materie thematisiert, um so einen Einblick in die Atomphysik zu bekommen. Werner sieht es als einen Vorteil an, dass beim Übergang von klassischen zu quantenphysikalischen Beschreibungen kein Wechsel der benutzten Modelle und Formalismen erfolgt. Der bereits in der Optik benutzte Zeigerformalismus wird weiter verwendet, um damit die quantenphysikalischen Phänomene zu beschreiben.

Am Anfang des Unterrichtskonzeptes werden die Quanteneigenschaften des Lichts am Doppelspalt und mit Hilfe des Photoeffekts erarbeitet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden dann auf das Medium „Elektronium“ übertragen. Mit diesem neuen Begriff soll die Trennung der mathematisch formulierten Quantentheorie und der experimentellen, physikalischen Interpretation sprachlich verdeutlicht werden. Der Begriff Elektronium wird für das Medium benutzt, das sich vor der Messung in einem reinen Zustand befindet, ganz im Gegensatz zu den Elektronen, die ihre Bedeutung mit den klassischen Eigenschaften Ort und Impuls erst bei der Registrierung erhalten. Das Elektronium verhält sich in vielen Versuchen

ähnlich wie Licht und gibt die mathematische Funktion der Antreffwahrscheinlichkeit von Elektronen an. Nach dem Beobachten von Interferenzbildern werden mit Hilfe des Zeigerformalismus Antreffwahrscheinlichkeiten von Elektronen berechnet. Auf der Grundlage der Experimente mit Licht und Elektronium und deren Beschreibung durch rotierende Zeiger wird nun ein quantenmechanisches Atommodell unter Verwendung des Zeigerformalismus entwickelt. Die Einführung in das Atommodell wird mit einem historischen Überblick begonnen. Der Zugang zum Orbitalmodell erfolgt über die Beschreibung des Elektroniums in einem eindimensionalen Raum, dem sogenannten Å-Rohr. Die Energieniveaus des Wasserstoffatoms können durch das Übertragen des Verhaltens des Elektroniums auf den dreidimensionalen Raum einer Kugel näherungsweise bestimmt werden. Dabei wird die potentielle Energie auf der Grundlage des Coulombschen Feldes berücksichtigt. Der Begriff Orbital wird für die Verteilung der Antreffwahrscheinlichkeit der Elektronen eingeführt.

Die Durchführbarkeit dieses Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Quantenphysik wurde in einem 11. Jahrgang eines Berliner Gymnasiums getestet und in Form einer deskriptiven Studie evaluiert. Aus den Ergebnissen der Untersuchung zu den Schülervorstellungen geht hervor, dass die quantenmechanischen Teilchenvorstellungen zugenommen haben. Allerdings werden Aussagen, die klassische Vorstellungen widerspiegeln, weiterhin verwendet.

4.3 Polarisierung von Licht als Zugang zur Quantenphysik

In dieser Arbeit wird in Kapitel 5 ein Unterrichtsgang skizziert, der anhand der Polarisierungseigenschaft des Lichts von der Beobachtung dieses optischen Phänomens ausgehend einen Zugang zu quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien entwickelt. Dabei bildet der elektrische Feldvektor die Verknüpfung zwischen der klassischen und der quantenphysikalischen Beschreibung der Polarisierungsexperimente, in dem er zunächst die optischen Polarisierungsexperimente beschreibt und im weiteren Verlauf des Unterrichtsganges als Wahrscheinlichkeitsamplitude gedeutet wird, die das quantenphysikalische Verhalten von Photonen veranschaulicht.

Die Polarisierung von Licht wird am Anfang des Unterrichtsganges im Rahmen eines fächerübergreifenden Kontextes eingeführt, in dem die Navigation der Insekten nach dem polarisierten Himmelslicht als Einstieg dient. Die Erzeugung und die Eigenschaften von polarisiertem Licht werden anhand von einfachen qualitativen Schüler- und Demonstrationsexperimenten mit Polarisationsfolien erarbeitet. Zur Erklärung dieser Experimente auf der Modellebene

wird der elektrische Feldvektor und dessen Komponentenzerlegung benutzt. Dabei stellt die Länge der Projektion des elektrischen Feldvektors auf die Durchlassachse des Polarisationsfilters ein Maß für die durchgehende Intensität dar, und die sich aus der Projektion ergebende Richtung des elektrischen Feldvektors ergibt die Polarisationsrichtung des durchgehenden Lichts. Zur Klärung der Navigation der Insekten wird der blaue Himmel durch Polarisationsfilter beobachtet und die Abhängigkeit des Polarisationsgrades von Sonnenstand und Blickrichtung gezeigt. Warum die Insekten die Polarisationsrichtung des Himmelslichts erkennen können, wird anhand des Aufbaus des Komplexauges erläutert. Verantwortlich dafür ist die selektive Absorption des polarisierten Lichtes in den Sehzellen des Komplexauges. Dasselbe Prinzip der selektiven Absorption findet ebenfalls in der Netzhaut des menschlichen Auges statt, wodurch das Phänomen der Haidinger-Büschel (siehe Kapitel 5.2.2) bei der Wahrnehmung von polarisiertem Licht hervorgerufen wird. Die selektive Absorption und die daraus resultierende Wahrnehmung der Polarisationsrichtung des Lichts werden in beiden Beispielen durch eine Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors erklärt.

Im weiteren Verlauf des Unterrichtsganges wird über die qualitative Beschreibung der Polarisation hinausgehend eine Einführung in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien erarbeitet. Die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors wird für eine quantitative Beschreibung der Polarisationsexperimente wieder aufgegriffen. In Experimenten mit Polarisationsfiltern und Licht wird durch Intensitätsmessungen das Malussche Gesetz und der quadratische Zusammenhang zwischen Intensität und elektrischem Feldvektor hergeleitet (siehe Kapitel 5.3.1). Als Abschluss der klassischen Polarisationsexperimente werden Interferenzexperimente mit einem Michelson-Interferometer durchgeführt, in dessen Gängen Polarisationsfilter eingefügt sind. Das in Abhängigkeit der Polarisationsrichtungen entstehende Interferenzmuster wird mit Hilfe der Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors beschrieben und führt zum Superpositionsprinzip der elektrischen Feldvektoren (siehe Kapitel 5.3.2).

Beim Übergang zur Quantenphysik werden die im vorangegangenen Unterrichtsabschnitt durchgeführten Polarisationsexperimente im weiteren Verlauf als Gedankenexperimente in der Photonenvorstellung diskutiert. Zur Beschreibung der Polarisation von Photonen wird der Begriff des Zustandes eingeführt, der durch die Wechselwirkung zwischen Photonen und dem Polarisationsfilter erzeugt wird. Dabei wird von der Betrachtung vieler Photonen, die einen Polarisationsfilter durchdringen, auf den Polarisationszustand eines einzelnen Photons

geschlossen (siehe Kapitel 5.4.1). Das Malussche Gesetz wird in der Teilchenvorstellung wieder aufgegriffen, um damit zu einer statistischen Deutung der Polarisationsexperimente zu gelangen. Die Intensität des Lichts wird durch die Anzahl der Photonen ausgedrückt, und durch die Betrachtung einzelner Photonen wird mit Hilfe des Malusschen Gesetzes der Begriff der Wahrscheinlichkeit eingeführt. Daran anschließend wird der Produktsatz der Wahrscheinlichkeiten entwickelt. Als weiteres Prinzip der Quantenphysik wird das Superpositionsprinzip anhand der Überlagerung von Polarisationszuständen erarbeitet. Bei der Beschreibung von Interferenzexperimenten mit einzelnen Photonen wird die Notwendigkeit eines Analogons zum elektrischen Feldvektor deutlich. Diese Betrachtungen führen zum Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude und zum Superpositionsprinzip der Wahrscheinlichkeitsamplituden (siehe Kapitel 5.4.5). In Analogie zum quadratischen Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feldvektor und der Intensität wird der quadratische Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeitsamplitude und Wahrscheinlichkeit ermittelt. Zum Abschluss des Unterrichtsganges wird anhand des Lokalisationsproblems einzelner Photonen das von Brachner formulierte Fundamentalprinzip der Quantenphysik verdeutlicht (siehe Kapitel 5.4.6).

Teile dieses Konzeptes sind in zwei Physikkursen der gymnasialen Oberstufe unterrichtet und anhand einer deskriptiven Studie evaluiert worden. Die Unterrichtsversuche und die Ergebnisse der Studie sind in Kapitel 6 dargestellt.

4.4 Bewertung der Unterrichtskonzepte

In den vorangehenden Abschnitten wurden verschiedene Unterrichtskonzepte vorgestellt, die durch zum Teil sehr unterschiedliche Ansätze eine Beschreibung des Themas Polarisation von Licht sowie eine Einführung in die Quantenphysik ermöglichen. In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Konzepte mit den in dieser Arbeit dargestellten Ideen verglichen und bewertet.

Das in dieser Arbeit beschriebene Unterrichtskonzept beschreibt eine Einführung in die Quantenphysik mit Hilfe der Polarisation von Licht. Dabei wurde die Polarisation als Eigenschaft des Lichts anhand eines phänomennahen Einstiegs und innerhalb eines fächerübergreifenden Kontextes behandelt. Dieser Einstieg ist so angelegt, dass die Schülerinnen und Schüler durch gezielte Beobachtungen das Phänomen Polarisation in Form der Haidinger-Büschel selbst wahrnehmen. Dieser lebensnahe und am Phänomen orientierte

Ansatz soll im Vergleich zu einer traditionellen Behandlung des Themas, wie sie in Kapitel 4.1.1 dargestellt ist, das Interesse der Schülerinnen und Schüler steigern. Auf der Ebene der Modellbeschreibung wird die Polarisation auf der Grundlage des Wellenmodells durch die Komponentenerlegung des elektrischen Feldvektors beschrieben. Durch diese traditionelle Beschreibung lässt sich der Ansatz in einen Physikunterricht integrieren, in dem das Wellenmodell bereits eingeführt ist. Der in Kapitel 4.1.2 dargestellte Ansatz zur modellfreien Beschreibung der Polarisation geht ebenfalls vom Phänomen der Haidinger-Büschel aus, versucht allerdings auch weiterführend ausschließlich anhand dieses Phänomens die Polarisation zu beschreiben. Ein Problem dieses Vorgehens liegt in der relativ schwachen Erscheinung der Haidinger-Büschel. Es ist zweifelhaft, ob in einer Unterrichtssituationen die Haidinger-Büschel bei linear polarisiertem Licht durch Reflexion von hinreichend vielen Schülern erkannt werden können. Zudem kann der Formalismus der Stokes-Parameter und der Mueller-Matrizen zwar zur mathematischen Berechnung des polarisierten Lichtes benutzt werden, hat aber keine weiterführende Bedeutung für andere Themen. Im Gegensatz dazu werden die im Unterrichtsvorschlag dieser Arbeit erarbeiteten Modelle und Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung von polarisiertem Licht innerhalb der Teilchenvorstellung des Lichts wieder aufgegriffen und führen zu Begriffen und Prinzipien der Quantenphysik. Dieses Vorgehen ermöglicht nicht nur eine Vertiefung der bisher behandelten Modellbeschreibung sondern erweitert dessen Tragfähigkeit.

Das in dieser Arbeit dargestellte Konzept zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe verfolgt wie die in Kapitel 4.2 dargestellten Ansätze nicht den historischen Weg zur Einführung in die Quantenphysik, wie er in Kapitel 3.2.6 dargestellt ist. Mit dem in Kapitel 5 dargestellten Unterrichtsvorschlag soll den Schülerinnen und Schülern ein Einblick in das quantenphysikalische Verhalten von Photonen ermöglicht werden, die stellvertretend für andere Quantenobjekte betrachtet werden. Die quantenphysikalischen Begriffe und Prinzipien werden auf einer qualitativen Ebene behandelt, wobei auf einen umfangreichen mathematischen Formalismus verzichtet wird. Weiterhin werden nur die Begriffe und Prinzipien der Quantenphysik auf einem schulischen Niveau erarbeitet, die das grundlegende Verhalten von Quantenobjekten beschreiben. Im Gegensatz dazu steht der Vorschlag von Wiesner (siehe Kapitel 4.2.1), der durch sein Vorgehen sowohl ein hohes mathematisches Niveau bei den Schülerinnen und Schülern als auch eine hohe fachliche Kompetenz bei den Lehrerinnen und Lehrern voraussetzt. Neben der Fülle von Inhalten zur Quantenphysik soll der Übergang zur Quantenphysik bei Wiesner als „harter Bruch“ vollzogen werden. Das bedeutet, dass Bezüge zur klassischen Physik weitgehend vermieden werden sollen und dass der Unterschied

zwischen klassischen Phänomenen und Quantenphänomenen deutlich herausgearbeitet werden soll. Im Gegensatz dazu verfolgt der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz das Ziel, den Übergang von einer klassischen Beschreibung der Experimente hin zu einer quantenmechanischen Beschreibung „fließend“ zu gestalten. Dieses Vorgehen wird anhand von Polarisationsexperimenten durchgeführt, die zunächst klassisch mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben werden und darauf aufbauend in der Teilchenvorstellung von Licht gedeutet werden. Das andersartige Verhalten der Quantenobjekte wird dann durch die Einführung neuer Begriffe und Prinzipien beschrieben.

Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik (siehe Kapitel 4.2.2) und die Berliner Konzeption (siehe Kapitel 4.2.3) unterscheiden sich in Bezug auf die Inhalte, die Experimente und den mathematischen Anspruch nur wenig von der von Wiesner entwickelten Einführung in die Quantentheorie. In allen Vorschlägen wird durch eine alternative Begriffswahl und eine sorgfältige Argumentation versucht, den Unterschied zur klassischen Physik als „harten Bruch“ herauszuarbeiten. Das quantenphysikalische Verhalten von Photonen bzw. Elektronen wird sowohl im Münchener als auch im Berliner Konzept mit Hilfe von Computersimulationen bzw. Trickfilmen veranschaulicht. Der in dieser Arbeit vorgestellte Unterrichtsvorschlag verzichtet auf diese Art der Veranschaulichung. Es wird ausgehend von real durchführbaren Polarisationsexperimenten ein Weg hin zu einer quantenphysikalischen Beschreibung aufgezeigt.

In dem Unterrichtskonzept „Vom Licht zum Atom“ (siehe Kapitel 4.2.4) wird die Quantenphysik mit Hilfe eines Formalismus dargestellt, der bereits klassische Experimente mit Licht beschrieben hat. Das dort benutzte Modell ist der Zeigerformalismus, der allerdings nicht Gegenstand eines traditionellen Unterrichts ist. Wird Quantenphysik mit diesem Modell unterrichtet, so ist die Kenntnis des Zeigerformalismus eine Voraussetzung dafür, die bereits vor dem eigentlichen Quantenphysikunterricht erfüllt werden muss. Der im folgenden Kapitel dargestellte Unterrichtsvorschlag geht dagegen von einer Beschreibung klassischer Polarisationsexperimente mit Hilfe des elektrischen Feldvektors aus. Dieser Beschreibung liegt das Wellenmodell zugrunde, das das übliche Modell zur Beschreibung von elektromagnetischer Strahlung im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe ist. Damit wird jeder Lehrkraft die Verwendung dieses Unterrichtsganges innerhalb der schulüblichen Inhalte ermöglicht.

5 Darstellung des eigenen Unterrichtskonzeptes

In diesem Kapitel wird das von mir entwickelte Unterrichtskonzept dargestellt, das einen Lernweg von der Beobachtung eines physikalischen Phänomens bis hin zu abstrakten quantenphysikalischen Begriffen anhand der Polarisierung von Licht aufzeigt. Dazu wird in das Thema der Polarisierung von Licht innerhalb eines fächerübergreifenden Kontextes eingeführt, in dem die physikalische Eigenschaft der Polarisierung im Zusammenhang mit der physiologischen Ursache der Wahrnehmung von polarisiertem Licht bei Insekten und Menschen behandelt wird. Das Verhalten des polarisierten Lichts wird dabei durch das Modell des elektrischen Feldvektors und dessen Komponentenzersetzung beschrieben. Ausgehend von der Beschreibung klassischer Polarisierungsexperimente wird der elektrische Feldvektor weiterführend als tragfähiges Modell benutzt, das in der quantenphysikalischen Deutung der Polarisierungsexperimente wichtige Begriffe und Prinzipien der Quantenphysik beschreibt. Die Inhalte des Unterrichtsvorschlages sind so dargestellt und strukturiert, dass eine Lehrkraft ihren konkreten Unterricht darauf aufbauen kann. Abbildung 17 gibt einen Überblick über die Inhalte dieses Kapitels.

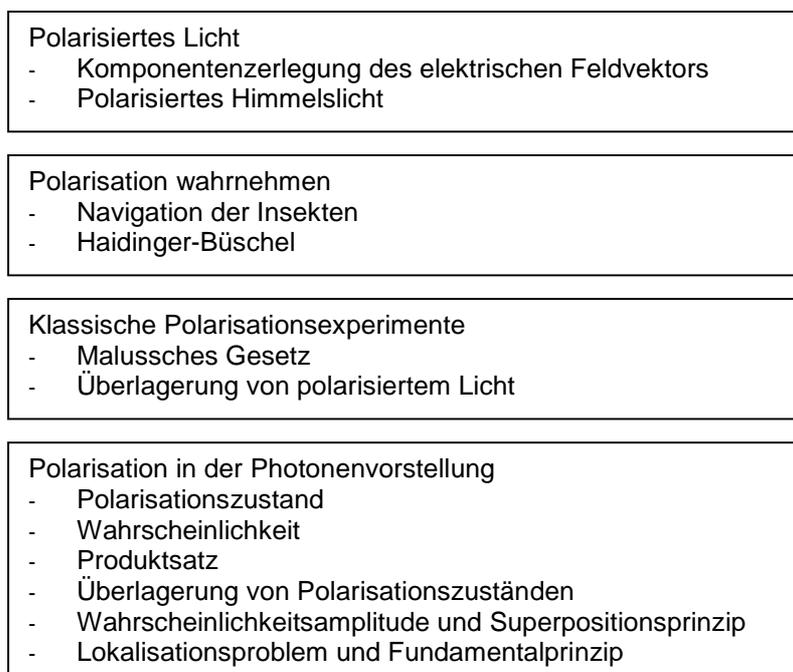


Abbildung 17: Überblick über die Inhalte des Unterrichtskonzeptes.

Teile dieses Unterrichtsvorschlages sind in einem Physikgrundkurs und einem Physikleistungskurs der gymnasialen Oberstufe von mir unterrichtet worden. Weiterhin sind grundlegende Ideen dieses Vorschlages auf verschiedenen Tagungen vorgetragen und veröffentlicht worden (Rieck 1998 und Rieck 2001).

Im Folgenden wird der Unterrichtsgang mit den dazugehörigen Experimenten und Erläuterungen beschrieben. Der Unterrichtsverlauf entwickelt sich entlang von Fragen. Mit Experiment gekennzeichnete Abschnitte dienen als Basis für eine Auswahl von Experimenten, die im Unterricht durchgeführt werden können. Der Abschnitt Beobachtung beschreibt, was die Schülerinnen und Schüler bei der Durchführung des Experiments beobachten. Der mit Erklärung bezeichnete Abschnitt beinhaltet eine kurze fachliche Erklärung der beobachteten Experimente. Im Abschnitt Anmerkungen werden zusätzliche Informationen, zum Teil didaktische Reflexionen und Hinweise für weitere Experimente für den Unterrichtenden gegeben.

5.1 Polarisiertes Licht

Anmerkung: Zu Beginn des Unterrichts wird durch einen Lehrfilm oder Lehrtext beschrieben, dass sich Insekten, wie zum Beispiel Bienen, Hummeln und Ameisen mit Hilfe eines besonderen „Kompasses“ in ihrer Umgebung orientieren. Diese Insekten benutzen auf der Suche nach Futter das polarisierte Licht³ des Himmels als Navigationshilfe. Blicken wir Menschen in den blauen Himmel, so können wir zunächst kein Muster erkennen, anhand dessen wir uns orientieren könnten. Offensichtlich ist polarisiertes Licht für den Menschen ohne Hilfsmittel zunächst nicht als solches zu erkennen. Um die Eigenschaft des polarisierten Lichts näher untersuchen zu können, werden Polarisationsfolien benutzt, mit denen polarisiertes Licht erzeugt und nachgewiesen werden kann.

Schülerexperiment: Die Schülerinnen und Schüler blicken durch einen Polarisationsfilter auf eine hell beleuchtete weiße Fläche. Ein zweiter Polarisationsfilter wird hinzugenommen und während des Durchblickens gegen den ersten Polarisationsfilter gedreht.

³ Im Unterrichtskonzept wird lediglich der Ausdruck „polarisiertes Licht“ benutzt, obwohl der fachlich korrekte Ausdruck „linear polarisiertes Licht“ ist, da zirkular polarisiertes Licht hier nicht verwendet wird.

Beobachtung: Blicken die Schülerinnen und Schüler durch einen einzelnen Polarisationsfilter auf die beleuchtete weiße Fläche, so verhält sich die Polarisationsfolie wie ein Graufilter und absorbiert einen Teil des Lichtes, wodurch die weiße Fläche dunkler erscheint. Wird ein zweiter Polarisationsfilter hinzugenommen, so ist zu beobachten, dass je nach Stellung der Polarisationsfilter zueinander viel Licht bis gar kein Licht diese Anordnung durchdringt. Um dieses Phänomen weiter zu untersuchen, wird dieser Versuch auf einer optischen Bank als Demonstrationsexperiment nachgestellt.

Experiment: Zunächst wird das unpolarisierte Licht einer Experimentierleuchte qualitativ durch die Beobachtung der auf den Schirm auftreffenden Intensität beim Drehen eines einzelnen Polarisationsfilters beobachtet.

Beobachtung: Wird die Durchlassachse eines einzelnen Polarisationsfilters gedreht, so verändert sich die durchgehende Lichtintensität nicht. Der Polarisationsfilter scheint wie ein Graufilter zu wirken und absorbiert unabhängig von der Stellung seiner Durchlassachse Licht.

Experiment: Anschließend wird ein zweiter Polarisationsfilter hinzugenommen. Das durch den ersten Polarisationsfilter durchgehende Licht trifft auf den zweiten Polarisationsfilter. Die Stellung der Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters bleibt unverändert in Richtung der Vertikalen, die als 0° Richtung bezeichnet wird, stehen. Die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters wird bei 0° beginnend um 360° langsam gedreht, bis seine Ausgangsstellung wieder erreicht ist (siehe Abbildung 18).

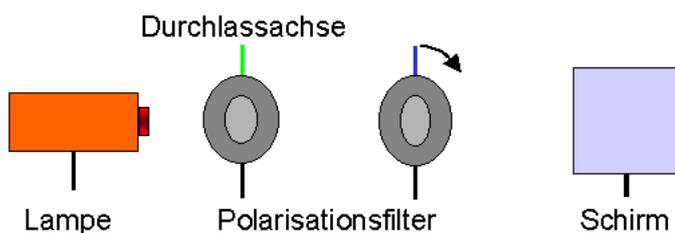


Abbildung 18: Versuchsaufbau zur qualitativen Untersuchung von polarisiertem Licht.

Beobachtung: Während des Drehens verändert sich die auf den Schirm auftreffende Intensität. Die Schülerinnen und Schüler stellen fest, dass in regelmäßigen Abständen die Lichtintensität abnimmt, bis zur vollständigen Dunkelheit. Dreht man weiter, nimmt die Intensität wieder zu. Es zeichnen sich vier Stellungen der Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters aus, bei denen abwechselnd minimale und maximale Helligkeit auf dem Schirm zu sehen ist. Diese vier Stellungen liegen jeweils um 90° zueinander gedreht. Sind die Durch-

lassachsen der beiden Polarisationsfilter parallel, so durchdringt Licht mit maximaler Intensität die Anordnung. Im Gegensatz dazu tritt kein Licht durch die Anordnung, wenn die Durchlassachsen der Polarisationsfilter senkrecht zueinander stehen. Zwischen diesen beiden ausgezeichneten Stellungen erkennen die Schülerinnen und Schüler, dass während des Drehens der Durchlassachse die Intensität nicht gleichmäßig zu- bzw. abnimmt.

Erklärung: Die Durchlassachse beschreibt eine Vorzugsrichtung in der Polarisationsfolie, deren Ausrichtung die Polarisationsrichtung des Lichts bestimmt. Die Durchlassachse des Polarisationsfilters ist durch einen Richtungspfeil gekennzeichnet. Die dazu senkrecht liegende Richtung wird als Absorptionsachse bezeichnet. Die Polarisationsfolie ist nur für die Komponenten des unpolarisierten Lichts durchlässig, die parallel zur Durchlassachse orientiert sind. Tritt unpolarisiertes Licht durch eine Polarisationsfolie, so liegt hinter der Folie nur noch eine Polarisationsrichtung vor, die parallel zur Durchlassachse ist. Tritt das polarisierte Licht durch einen zweiten Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse parallel zu der des ersten ist, so gelangt das Licht ungeschwächt durch diesen hindurch. Ist die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters um 90° gedreht, so ist der zweite Filter undurchlässig für das Licht. Zwei Polarisationsfilter, deren Durchlassachsen einen Winkel von 90° einschließen, werden als gekreuzte Filter bezeichnet.⁴

5.1.1 Die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors

Anmerkung: Es wird davon ausgegangen, dass den Schülerinnen und Schülern an dieser Stelle bereits bekannt ist, dass Licht mit Hilfe des Wellenmodells beschrieben werden kann. Auf diese Modellvorstellung aufbauend wird der transversale Charakter des Lichts senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung als Polarisation eingeführt (siehe Kapitel 3.1). Die Größe der Auslenkung zu einer bestimmten Zeit wird als Elongation bezeichnet und wird durch den elektrischen Feldvektor beschrieben. Die Lage des elektrischen Feldvektors senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts stellt die Polarisationsrichtung des Lichts dar, wobei in den folgenden Experimenten die Polarisationsrichtung immer durch den elektrischen Feldvektor beschrieben wird, der die maximale Auslenkung des elektrischen Feldes darstellt. Das uns umgebende Licht oder das Licht der Experimentierlampe besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Polarisationsrichtungen und wird als natürliches oder unpolarisiertes Licht bezeichnet. Mit Hilfe des elektrischen Feldvektors kann jede Polarisationsrichtung des

⁴ Die physikalische Erklärung der Polarisation durch Polarisationsfolien wird in Kapitel 3.1.2.1 gegeben.

elektrischen Feldes einer Lichtquelle in einer Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts liegt, aus zwei zueinander senkrechten Komponenten dargestellt werden (siehe Kapitel 3.1.1).

Erklärung: Wie in Abbildung 19 dargestellt, kann mit Hilfe einer graphischen Konstruktion die Polarisationsrichtung nach Durchgang des Lichts durch einen Polarisationsfilter konstruiert werden. Dazu werden die elektrischen Feldvektoren des unpolarisierten Lichts auf die Durchlassachse der Polarisationsfilter projiziert. Durch die Projektion auf die Durchlassachse wird die Polarisationsrichtung des durchgehenden Lichts bestimmt.

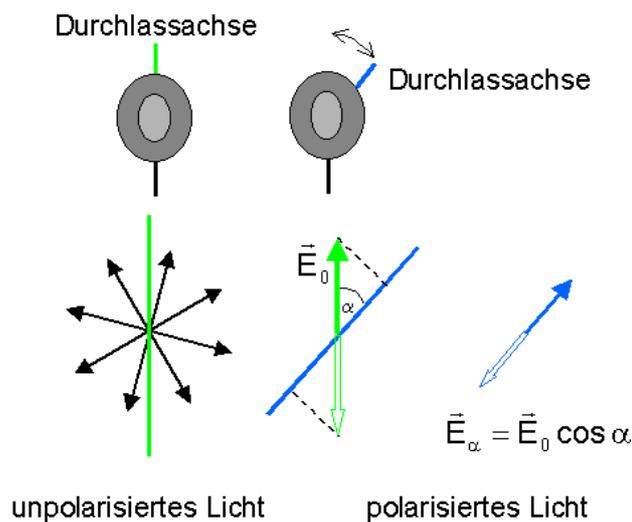


Abbildung 19: Konstruktion der Polarisationsrichtung mit dem elektrischen Feldvektor.

Aus der Komponentenzersetzung wird ersichtlich, dass sich der elektrische Feldvektor \vec{E}_0 aus der Projektion aller Polarisationsrichtungen des unpolarisierten Lichts auf die Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters ergibt⁵. Der elektrische Feldvektor \vec{E}_α ergibt sich aus der Projektion des ursprünglichen Vektors \vec{E}_0 auf die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters. Die Länge von \vec{E}_α ergibt sich aus $|\vec{E}_\alpha| = |\vec{E}_0| \cdot |\cos \alpha|$, wobei α der Winkel ist, der von den Durchlassachsen eingeschlossen wird. Die Länge von \vec{E}_α ist damit linear abhängig vom Betrag des Kosinus des Winkels α . Das bedeutet, dass je größer α ist, desto kleiner ist \vec{E}_α . Eine ähnliche Abhängigkeit ist im Experiment zwischen der durchgehenden Intensität und

⁵ In Anhang A wird dargestellt, dass rechnerisch die Hälfte der eingestrahnten Intensität den ersten

Polarisationsfilter durchdringt. Die Länge von \vec{E}_0 ist in der graphischen Konstruktion verkürzt dargestellt.

dem Winkel α zu beobachten, denn je größer α ist, desto geringer ist die durch den Polarisationsfilter durchgehende Intensität.

Anmerkung: An dieser Stelle wird deutlich, dass der Polarisationsfilter nicht, wie in einigen Schulbüchern dargestellt (siehe Kapitel 3.1.4), wie ein Gitter wirkt, das nur eine einzelne Polarisationsrichtung durchlässt. Der Polarisationsfilter wirkt wie ein Projektor, der alle Polarisationsrichtungen auf die Richtung seiner Durchlassachse projiziert.

Ergebnis: Die Lage des elektrischen Feldvektors nach der Projektion auf die Durchlassachse ergibt die neue Polarisationsrichtung des durchgehenden Lichts. Die Länge des elektrischen Feldvektors ist ein Maß für die Intensität des durchgehenden Lichts.

Experiment: Zwischen zwei gekreuzte Polarisationsfilter wird ein dritter Polarisationsfilter gestellt, dessen Durchlassachse in Richtung der Winkelhalbierenden von 45° liegt. Der schematische Aufbau dieses Experiments ist in Abbildung 20 dargestellt.

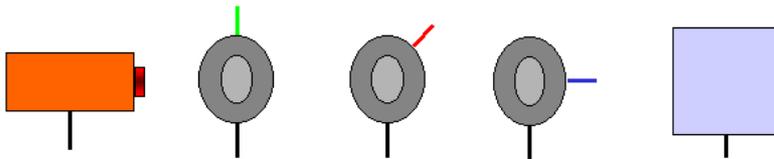


Abbildung 20: Polarisationsfilter zwischen gekreuzten Polarisationsfiltern.

Beobachtung: Durch zwei gekreuzte Polarisationsfilter tritt kein Licht hindurch. Wird der dritte Polarisationsfilter dazwischengestellt, so tritt zur Verblüffung der Schülerinnen und Schüler Licht durch die Anordnung durch.

Erklärung: Dieses Experiment kann mit Hilfe der Komponentenzzerlegung einfach erklärt werden. In Abbildung 21 ist die schematische Zerlegung des elektrischen Feldvektors für dieses Experiment mit drei Polarisationsfiltern dargestellt.

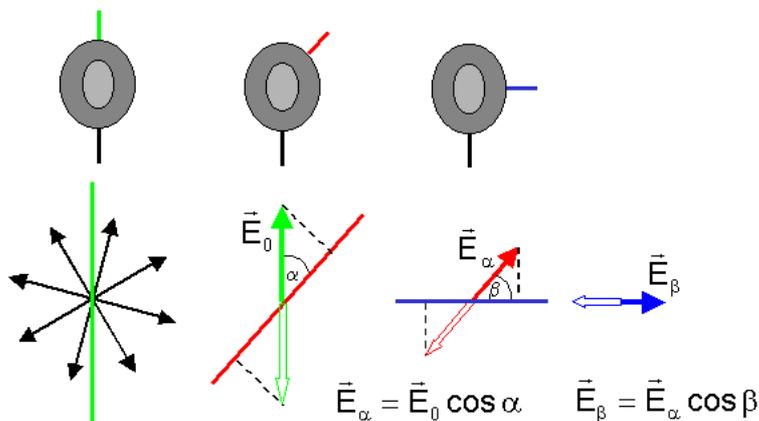


Abbildung 21: Komponentenzzerlegung des elektrischen Feldvektors bei drei Polarisationsfiltern.

Dieses Experiment kann fortgeführt werden, in dem weitere Polarisationsfilter zwischen die gekreuzten Polarisationsfolien gestellt werden. Aus der Komponentenzerlegung wird ersichtlich, dass durch viele Polarisationsfolien zwischen den gekreuzten Polarisationsfiltern der Winkel zwischen den aufeinander folgenden Durchlassachsen immer kleiner wird. Die durch die Anordnung durchgehende Lichtintensität wird theoretisch immer größer, je kleiner der Winkel zwischen den aufeinander folgenden Durchlassachsen ist. Praktisch ist dieses Verfahren mit bis zu fünf Polarisationsfolien hintereinander durchzuführen. Bei weiteren Polarisationsfolien überwiegen die Verluste des durchgehenden Lichts durch Reflexion an den Folien.⁶

Als Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Unterrichtseinheit zum polarisierten Licht kann Folgendes festgehalten werden:

Ergebnis: Ein Polarisationsfilter polarisiert das natürliche Licht. Mit einem Polarisationsfilter kann polarisiertes Licht nachgewiesen werden. Polarisiertes Licht ist daran zu erkennen, dass die durch den Polarisationsfilter durchgehende Intensität sich verändert, wenn der Filter um die Blickrichtung gedreht wird. Mit der graphischen Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors können die Polarisationsrichtung und der durchgehende Anteil des polarisierten Lichts konstruiert werden. Die Lage des resultierenden Vektors zeigt die Polarisationsrichtung an, und die Länge des Vektors ist ein Maß für die Intensität des durchgehenden Lichts.

Anmerkung: Im vorangegangenen Abschnitt ist die Polarisation als physikalische Eigenschaft des Lichts untersucht worden. Dabei wurde die Erzeugung von polarisiertem Licht durch einen Polarisationsfilter und der Nachweis mit einem solchen Filter behandelt. Das polarisierte Licht wurde mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben. Der Ausgangspunkt dieser Ausführungen war die Orientierung von Insekten nach dem polarisierten Himmelslicht, was zu der Frage führt:

Frage: Wie entsteht das polarisierte Licht am blauen Himmel?

5.1.2 Polarisiertes Himmelslicht

Schülerexperiment: Die Schülerinnen und Schüler untersuchen mit einem Polarisationsfilter den blauen Himmel.

⁶ Diese Betrachtungen können zu einem Funktionsmodell für die optische Aktivität weiterentwickelt werden, das an dieser Stelle nicht ausgeführt werden soll. Einzelheiten zu diesem Thema sind in Rieck (1999) dargestellt.

Beobachtung: Bei der Beobachtung des blauen Himmels durch eine Polarisationsfolie stellen die Schülerinnen und Schüler fest, dass das Licht in Abhängigkeit zum Sonnenstand unterschiedlich stark polarisiert ist. Senkrecht zur Richtung der Sonne kann das Licht bei geeigneter Stellung der Polarisationsfolie fast vollständig ausgelöscht werden. Das Licht aus Richtung der Sonne kann durch keine Durchlassachsenstellung ausgelöscht werden. In den Zwischenbereichen kann das Licht nur teilweise ausgelöscht werden.

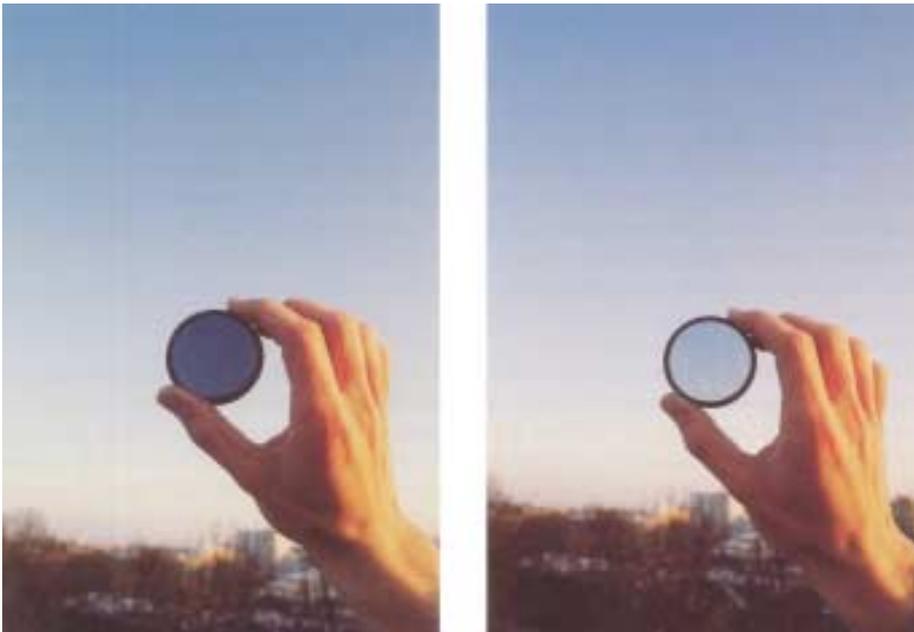


Abbildung 22: Himmel durch Polarisationsfilter in zwei verschiedenen Stellungen (aus Hoeppe 1999).

Um festzustellen, ob das Sonnenlicht die Ursache des polarisierten Lichts ist, wird folgendes Experiment durchgeführt.

Schülerexperiment: In ein Stück Karton wird ein kleines Loch geschnitten, das als Blendenöffnung dient. Der Karton wird so gehalten, dass das durch das Loch fallende Sonnenlicht ein Abbild der Sonne auf dem Boden erzeugt. Vor das Loch wird eine Polarisationsfolie gehalten und gedreht, während dabei das Abbild der Sonne auf dem Boden beobachtet wird.

Beobachtung: Die Lichtintensität des Abbildes schwankt nicht, während der Polarisationsfilter vor der Blende gedreht wird.

Ergebnis: Das Sonnenlicht ist unpolarisiert. Die Ursache für das polarisierte Licht am Himmel liegt somit nicht im Sonnenlicht selbst.

Anmerkung: Im folgenden Experiment soll die Luft, durch die sich das Sonnenlicht ausbreitet, als mögliche Ursache für die Polarisation des Himmelslichts untersucht werden. Dazu wird die Atmosphäre durch ein mit Wasser gefülltes Aquarium simuliert.

Experiment: Ein Aquarium wird mit Leitungswasser befüllt und mit einer Experimentierleuchte angestrahlt. In das Wasser werden wenige Tropfen Milch gerührt. Das zu den Seiten gestreute sowie das durchgehende Licht wird mit einem Polarisationsfilter untersucht. Der schematische Aufbau dieses Experiments ist in Abbildung 23 dargestellt.

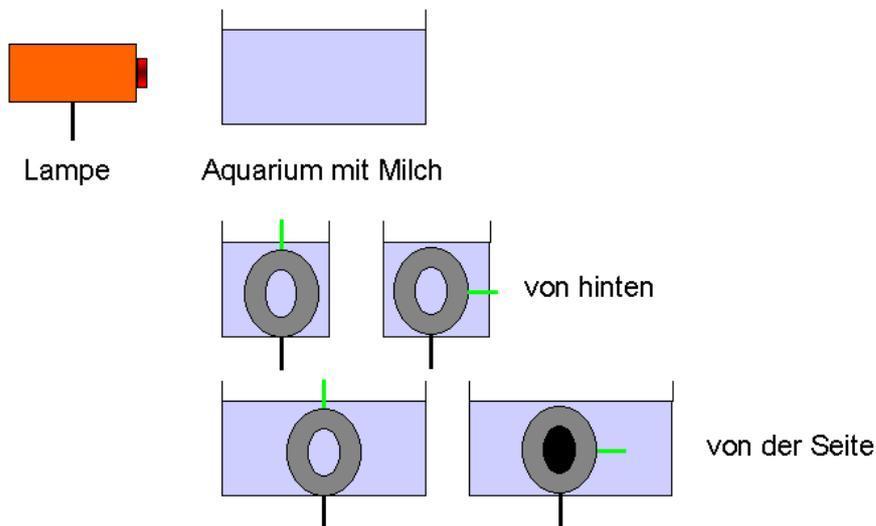


Abbildung 23: Schematischer Aufbau zur Streuung von Licht.

Beobachtung: Bevor die Milch ins Wasser gerührt wird, durchdringt das Licht das Aquarium vollständig. Betrachtet man das sich durch das Wasser ausbreitende Licht mit einem Polarisationsfilter, so wird keine Polarisation festgestellt. Werden einige Tropfen Milch in das Wasser gerührt, so wird das Licht zu allen Seiten gestreut. Bei der Betrachtung des gestreuten Lichts durch einen Polarisationsfilter stellen die Schülerinnen und Schüler fest, dass das senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gestreute Licht polarisiert ist. Die Streuung des Lichts scheint verantwortlich für die Polarisation des Lichts zu sein.

Erklärung: Trifft Licht auf Objekte, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts, so werden die Ladungen der Objekte zu Schwingungen angeregt und strahlen ihrerseits in alle Richtungen ab. Dieses Phänomen wird als Streuung bezeichnet. Damit das Licht in ausreichender Intensität gestreut wird, muss es auf viele Objekte treffen, die es streuen. Die Partikel der Milch im Wasser oder die Luftmoleküle in der Atmosphäre sind die Objekte, an denen das Licht gestreut wird. Die Streuung ist die Ursache für polarisiertes Licht und damit auch für das polarisierte Himmelslicht. Trifft das unpolarisierte Sonnenlicht auf streuende Luftmoleküle (siehe Abbildung 24), so oszillieren die Ladungen der Streuzentren durch das unpolarisierte Licht in alle Richtungen, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegen. Entlang der x -Achse, die 90° zur Ausbreitungsrichtung des Lichts liegt, wird nur die y -Komponente der Bewegung der Ladungen abgestrahlt. Da die elektromagnetische Welle

transversal ist, strahlt die y -Bewegung der Ladungen nicht in y -Richtung oder z -Richtung ab. Alles in y -Richtung gestreute Licht ist parallel zur x -Achse polarisiert. In den dazwischenliegenden Richtungen ist das Licht teilweise polarisiert (siehe Kapitel 3.1.2.2).

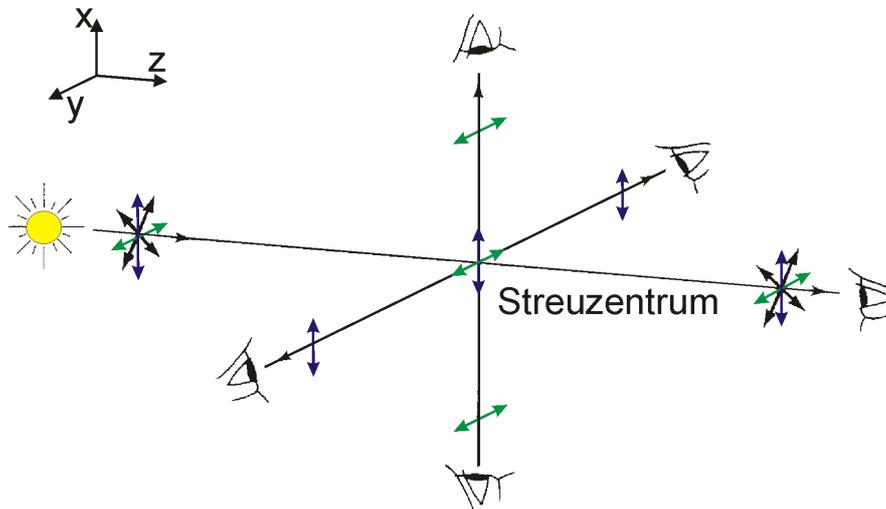


Abbildung 24: Lichtstreuung in der Atmosphäre (nach Falk 1990, S. 377).

Ergebnis: Das polarisierte Himmelslicht entsteht durch Streuung des unpolarisierten Sonnenlichts in der Atmosphäre. Das Himmelslicht ist genau dann vollständig durch Streuung polarisiert, wenn es aus Richtungen einfällt, die senkrecht zur Sonnenrichtung liegen. Das Licht aus Richtung der Sonne ist unpolarisiert. In den Zwischenbereichen ist das Licht teilweise polarisiert.

Anmerkung: Je nach Stand der Sonne entsteht durch Streuung ein regelrechtes Polarisationsmuster am blauen Himmel, das sich konzentrisch um den Sonnenstand am Himmel anordnet (siehe Abbildung 25). Mit zunehmendem Winkel zur Sonne nimmt der Anteil des polarisierten Lichts zu, um bei einem Winkel von 90° ein Maximum zu erreichen. Der Polarisationsgrad des Himmelslichts ist durch unterschiedlich dicke Balken für einen Betrachter dargestellt, der sich im Mittelpunkt der Halbkugel befindet. Steht die Sonne am Horizont, so nimmt der Polarisationsgrad des Lichts in Richtung Zenit zu. Je nach Anzahl der Streuzentren in der Atmosphäre kann das Licht bis zu einem Grad von 70% polarisiert sein. Blickt man zum Gegenpunkt der Sonne, so nimmt der Anteil des polarisierten Himmelslichts wieder ab, was durch die dünner werdenden Balken in Abbildung 25 angedeutet ist.

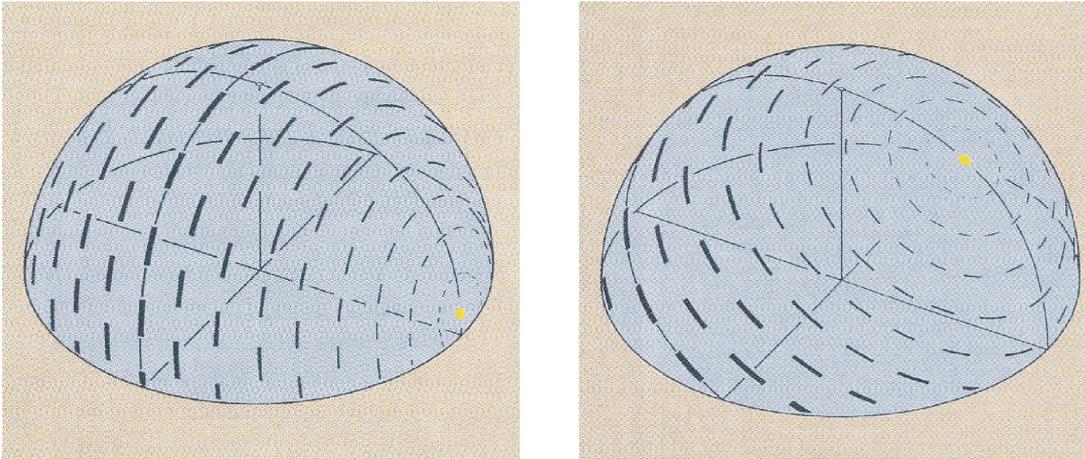


Abbildung 25: Polarisationsmuster am Himmel bei Sonnenaufgang und bei Sonnenstand in 60° Höhe (nach Wehner 1998, S. 60).

Da die Sonne im Verlauf des Tages ihren Standort am Himmel verändert, wandert das Polarisationsmuster mit der Sonne, wodurch die Polarisationsrichtung an einem festen Himmelspunkt im Tagesverlauf variiert. In Abbildung 25 sind für zwei verschiedene Sonnenstände die am Himmel entstehenden Polarisationsmuster dargestellt. Dabei steht die zu beobachtende Polarisationsrichtung senkrecht auf der Ebene, die durch die Sonne, den Beobachter und den beobachteten Himmelspunkt aufgespannt wird. Die beobachtete Polarisationsrichtung des Himmelslichts hängt somit vom Sonnenstand und von der Blickrichtung des Beobachters zum Himmel ab.⁷

Insekten, wie Bienen und einige Arten von Ameisen, sind in der Lage, dieses Polarisationsmuster des Himmels wahrzunehmen und danach zu navigieren (Wehner 1998).

Frage: Warum können Insekten das Polarisationsmuster ohne Hilfsmittel erkennen?

5.2 Polarisation wahrnehmen

In den folgenden Abschnitten werden die Informationen zum Komplexauge der Insekten und zum Aufbau des menschlichen Auges in einer lehrbuchartigen Form dargestellt.

⁷ Allerdings gibt es in der Nähe der Sonne und ihres Gegenpunktes Abweichungen von dieser Regel (Horváth 1998).

5.2.1 Navigation der Insekten

Bereits Ende der 40er Jahre des 20. Jahrhunderts stellte der Biologe und Naturforscher Karl von Frisch bei Untersuchungen zur Tanzsprache der Bienen fest, dass sich Bienen mit Hilfe des polarisierten Himmelslichts in ihrer Umgebung orientieren. Für seine umfangreichen Forschungen zu diesem Thema (Frisch 1965) erhielt von Frisch 1973 den Nobelpreis für Physiologie und Medizin. Verschiedene Versuche an Bienen (Frisch 1949) und an Ameisen (Wehner 1998) führten zu dem Ergebnis, dass die Insekten mit ihren Komplexaugen das polarisierte Licht identifizieren können, so wie Menschen unterschiedliche Farben sehen. Um zu verstehen, warum das Facettenauge empfindlich für polarisiertes Licht ist, wird es im Folgenden näher beschrieben. Diese Informationen könnten den Schülerinnen und Schülern in Form eines Schulbuchtextes vorgelegt werden.

Das Komplexauge der Insekten besteht aus bis zu 5000 Einzelaugen, von denen jedes Einzelauge eine Linse besitzt (siehe Abbildung 26).

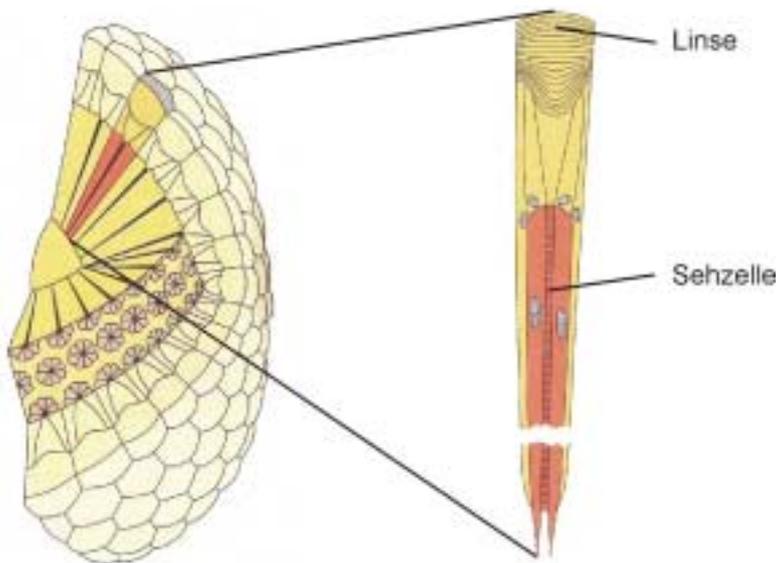


Abbildung 26: Komplexauge und Längsschnitt durch Einzelauge (nach Wehner 1998, S. 62).

Unter den Linsen der Einzelaugen befinden sich die lichtempfindlichen Sehzellen, die für die Wahrnehmung von polarisiertem Licht verantwortlich sind. Wehner hat in Experimenten mit Ameisen gezeigt, dass deren Komplexauge aus zwei verschiedenen Typen von Sehzellen aufgebaut ist (Wehner 1998). Die Ameisen besitzen Kurzwellen-Rezeptoren, deren Empfindlichkeitsmaximum im ultravioletten Spektralbereich des Lichts liegen und Langwellen-Rezeptoren, die ein Empfindlichkeitsmaximum im grünen Spektralbereich aufweisen. Die insgesamt acht stabförmigen Sehzellen liegen unterhalb jeder Linse eines Einzelauges. In der

Regel sind von den acht Sehzellen sechs Langwellenrezeptoren, die im grünen Spektralbereich absorbieren, und zwei Kurzwellenrezeptoren, die ihr Absorptionsmaximum im UV-Bereich besitzen. Allerdings kehrt sich dieses Verhältnis am oberen Rand des Komplexauges um, wo sechs UV-Rezeptoren zwei Grün-Rezeptoren gegenüber stehen. Verhaltensversuche an Ameisen zeigten, dass nur der Kurzwellentyp der Polarisationsnavigation dient, womit der obere Augenrand des Facettenauges spezialisiert ist auf die Wahrnehmung von polarisiertem Licht (Wehner 1998). Die hier dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen am Komplexauge der Ameisen wurden ebenfalls bei Bienen und anderen Insektenarten bestätigt (Rossel 1987).

Frage: Was ist das Besondere an den UV-Rezeptoren der Sehzellen, dass sie als Polarisationsdetektoren im physikalischen Sinn dienen können?

Erklärung: Die lichtempfindlichen Sehzellen in den Einzelaugen wirken wie eine hochkant aufgestellte Bürste. Die feinen als Mikrovilli bezeichneten Röhrcchen von nur ca. 50 nm Durchmesser bilden über die gesamte Länge der stabförmigen Sehzelle einen dichten Saum (siehe Abbildung 27).

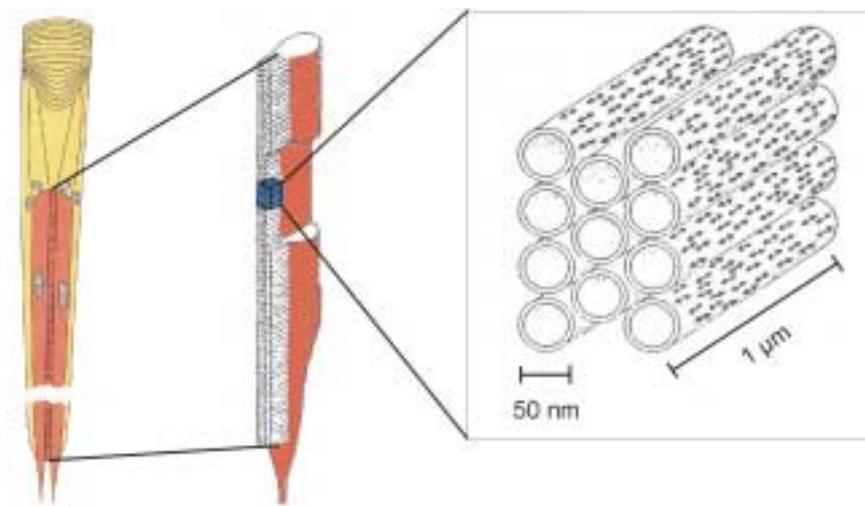


Abbildung 27: Abbildung der Sehzelle mit Mikrovilli (nach Hoeppe 1999, S. 112).

In die Sehzellen sind lichtempfindliche Moleküle des Sehfärbstoffes Rhodopsin eingelagert. Im Allgemeinen sind die Moleküle des Rhodopsin mit ihren Absorptionsachsen in der Längsachse der Mikrovilli angeordnet. In der polarisationsempfindlichen Zone am oberen Rand des Komplexauges sind die Mikrovilli jedoch streng parallel zueinander über die gesamte Länge des aufrechten Zellkörpers ausgerichtet. Licht, dessen elektrischer Feldvektor parallel zu der Mikrovilli-Achse ausgerichtet ist, wird von einem lichtabsorbierenden Anteil des Rhodopsins absorbiert. Dadurch zeigt das Sehpigment eine stark selektive Absorption.

Um zusätzlich eine gute Bestimmung der Polarisationsrichtung zu erhalten, sind in jedem Einzelauge der polarisationsempfindlichen Regionen stets zwei UV-Rezeptortypen vorhanden, deren Ausrichtung der Mikrovilli rechtwinklig zueinander ist. Abbildung 28 zeigt, dass die Mikrovilli aus den Bereichen 1 und 5 rechtwinklig zu der Ausrichtung der Mikrovilli 2, 4, 6 und 8 sind.

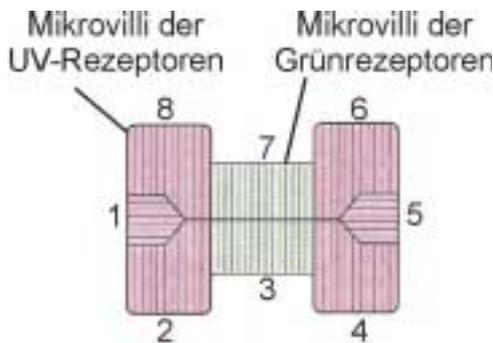


Abbildung 28: Querschnitt durch Mikrovilli (nach Wehner 1998, S. 62).

Diese unterschiedlichen Ausrichtungen sind neuronal miteinander verschaltet und erhöhen dadurch die Polarisationsempfindlichkeit. Die Mikrovilli der Grünrezeptoren sind nicht polarisationsempfindlich. In den übrigen Augenbereichen sind die Mikrovilli nicht streng parallel zueinander ausgerichtet, so dass über die gesamte Zelle keine einheitliche Orientierung der Mikrovilli entsteht. Damit können die Insekten in diesen Augenbereichen nicht zwischen verschiedenen Polarisationsrichtungen des Lichts unterscheiden.

Dieser spezielle Aufbau der Sehzellen ermöglicht den Insekten die Wahrnehmung des polarisierten Lichts, allerdings nur in denjenigen Sehzellen, die für ultraviolettes Licht empfindlich sind. Dies hat den Vorteil, dass die Insekten die im ultravioletten Spektralbereich besonders ausgeprägte Himmelpolarisation deutlich sehen können. Die Grün-Rezeptoren, die zum Sehen der Blüten prädestiniert sind, sind dagegen polarisationsblind. Durch diesen spezifischen Aufbau des Komplexauges können Insekten somit auf einen Blick das Polarisationsmuster des Himmels erkennen. Die Insekten scheinen zu wissen, welche Polarisationsrichtungen bei welchem Sonnenstand in welcher Himmelsposition mit welchem Polarisationsgrad auftreten, so dass das Polarisationsmuster zusammen mit einer „inneren“ Uhr zu einem Kompass wird. Zusätzlich ist die Zeit der Futtersuche eng begrenzt, so dass das Polarisationsmuster des Himmels innerhalb dieser kurzen Zeit im Wesentlichen konstant bleibt (Wehner 1998).

Ergebnis: Die Voraussetzung dafür, dass einige Insekten ohne Hilfsmittel polarisiertes Licht erkennen können, liegt in der selektiven Absorptionseigenschaft der Sehpigmentmoleküle.

Die lichtabsorbierende Komponente des Sehpigments verhält sich wie ein Dipol, der durch den parallel zu der Molekülachse liegenden Anteil des elektrischen Feldvektors angeregt wird. Das Sehpigment ist somit ein Analysator, dessen selektive Absorption von Licht durch dasselbe physikalische Prinzip beschrieben wird, wie es sich auch bei einer Polarisationsfolie findet (siehe Kapitel 3.1.2.1). Bei Bienen und anderen Insekten wirken die Photorezeptoren in den Sehzellen somit selbst als Polarisationsfilter. Der Polarisationsfilter zum Nachweis von polarisiertem Licht ist quasi direkt in die Sehzellen der Insekten eingebaut.

Frage: Ist auch das menschliche Auge in der Lage, polarisiertes Licht wahrzunehmen?

5.2.2 Haidinger-Büschel

Anmerkung: Für uns Menschen ist im Gegensatz zu den Bienen die Polarisation des Lichts bzw. dessen Polarisationsrichtung nicht ohne weiteres direkt erkennbar. In diesem Abschnitt wird mit Hilfe von Schülerexperimenten untersucht, ob das menschliche Auge unter Umständen doch in der Lage ist, polarisiertes Licht von unpolarisiertem Licht zu unterscheiden.

Schülerexperiment: Die Schülerinnen und Schüler blicken durch einen Polarisationsfilter auf eine hell beleuchtete Fläche, z.B. eine weiße Leinwand, die mit einem Overheadprojektor beleuchtet wird. Die Polarisationsfolie wird dabei langsam um die Blickrichtung gedreht (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Schematische Darstellung des Experiments.

Beobachtung: Bei genauer Betrachtung erscheint in der Mitte des Sehfeldes eine wie in Abbildung 30 schematisch dargestellte hantelförmige, schwach gelblich gefärbte Figur, die sich beim Drehen der Polarisationsfolie mitdreht.



Abbildung 30: Haidinger-Büschel bei vertikaler Polarisationsrichtung.

Schaut man direkt ohne Polarisationsfolie auf die beleuchtete Fläche, so ist die Figur, die als Haidinger-Büschel bezeichnet wird, verschwunden.⁸ Ist die Stellung der Durchlassachse des Polarisationsfilters bekannt, so lässt sich erkennen, dass die Längsachse der Figur immer senkrecht zur Durchlassachse des Polarisationsfilters liegt. Die Ausrichtung der Figur hängt offensichtlich mit der Polarisationsrichtung des Lichts zusammen.

Ergebnis: Dieses Phänomen zeigt, dass auch das menschliche Auge in der Lage ist, die Polarisationsrichtung des Lichts zu erkennen. Durch die Ausrichtung der Haidinger-Büschel lässt sich sogar die Polarisationsrichtung des polarisierten Lichts bestimmen.

Frage: Warum sehen wir die Haidinger-Büschel?

Beobachtung: Die Haidinger-Büschel werden immer in der Mitte des Sehfeldes beobachtet, unabhängig davon, auf welche Stelle der beleuchteten Fläche man schaut.

Erklärung: Aus dem Aufbau des Auges in Abbildung 31 wird deutlich, dass die Gegenstände, die wir in der Mitte unseres Sehfeldes sehen, auf der Netzhaut im Bereich des Gelben Flecks abgebildet werden. In der Mitte des Gelben Flecks liegt die Sehgrube, die Stelle des schärfsten Sehens.

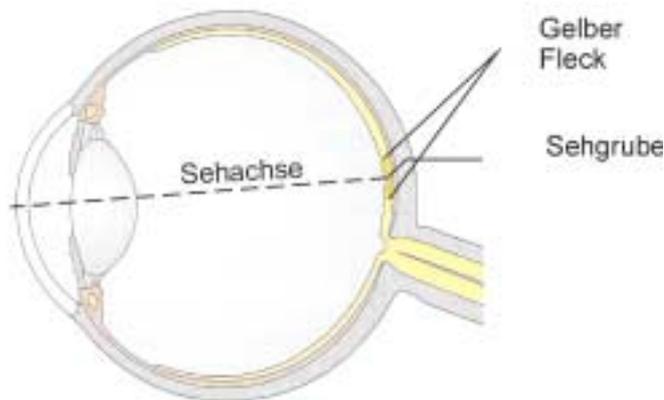


Abbildung 31: Querschnitt des menschlichen Auges (nach Bredthauer 1993, S. 52).

Der Gelbe Fleck hat tatsächlich eine gelbe Farbe, deren Ursache in der Einlagerung des Farbpigments Xanthophyll in diesem Bereich der Netzhaut zu finden ist. Xanthophyll hat die Eigenschaft, Licht im Wellenlängenbereich von 420-490 nm zu absorbieren. Das Farbpigment absorbiert damit den blauen Anteil des weißen Lichts, das durch das Auge im Bereich des Gelben Flecks auf die Netzhaut fällt.

⁸ Die Haidinger-Büschel wurden bereits 1844 von dem Österreicher Wilhelm Haidinger beschrieben (Haidinger 1844) und später als Haidinger-Büschel nach ihm benannt.

Bevor das Licht die Sehzellen erreicht, durchläuft es mehrere Zellschichten der Netzhaut. Das Farbpigment ist in der über den Sehzellen liegenden Schicht der Bipolarzellen und der Ganglienzellen eingelagert. Abbildung 32 zeigt den Aufbau der Netzhaut, aus dem die Anordnung der verschiedenen Zellschichten hervorgeht.

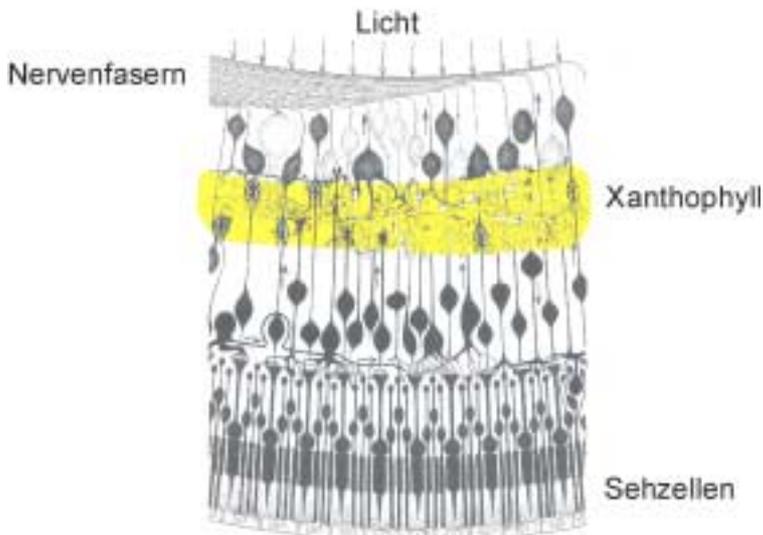


Abbildung 32: Abbildung der verschiedenen Zellschichten (nach Zenker 1985, S. 492).

Die Sehzellen erhalten durch die Absorption des blauen Anteils des Lichts den Farbeindruck der Komplementärfarbe Gelb (Zenker 1985), woraus sich der Grund für die gelbe Farbe der Haidinger-Büschel ergibt.

Das Auftreten der charakteristischen Hantelform dieser Figur erklärt sich durch das Absorptionsverhalten des Farbpigments. Von dem Absorptionsverhalten der Polarisationsfolie ist bereits bekannt, dass genau diejenige Schwingungsrichtung des auftreffenden Lichts absorbiert wird, die parallel zu den langkettigen Polymermolekülen ausgerichtet ist, aus denen die Polarisationsfolie aufgebaut ist. Licht der zu den Molekülen senkrecht liegenden Schwingungsrichtung wird ungeschwächt hindurch gelassen. Überträgt man dieses Absorptionsverhalten auf das gelbe Farbpigment, lässt sich daraus schließen, dass im Bereich der Haidinger-Büschel auf der Netzhaut das Farbpigment die Komponenten des Lichts absorbiert, die parallel zu den Molekülen des Pigments liegen. In diesem Gebiet wird dann der blaue Anteil des Lichts absorbiert und die nachfolgenden Sinneszellen erhalten den Farbeindruck gelb.

Beobachtung: Beim Drehen der Polarisationsfolie um die Blickrichtung wird deutlich, dass sich die Haidinger-Büschel im gleichen Maße mitdrehen und zwar rotationssymmetrisch um den Mittelpunkt unseres Sehfeldes.

Erklärung: Die rotationssymmetrische Figur der Haidinger-Büschel lässt eine rotationssymmetrische Anordnung der Moleküle um die Sehgrube vermuten, wie sie in Abbildung 33 dargestellt ist.

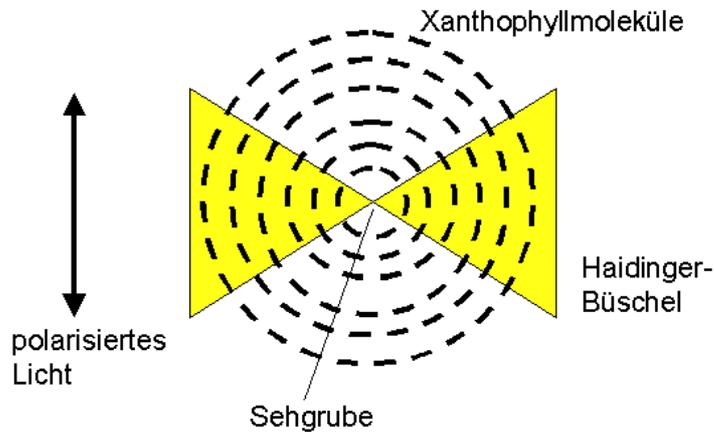


Abbildung 33: Anordnung der Moleküle im Bereich des Gelben Flecks (nach De Vries 1953, S. 423).

Fällt polarisiertes Licht auf den Gelben Fleck, so absorbieren immer nur die zu der Polarisationsrichtung des Lichts parallel liegenden Moleküle das blaue Licht. Durch diese Anordnung entsteht die gelbe Hantelform der Haidinger-Büschel, deren Längsachse immer senkrecht zu der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts liegt.

Die Adaptionsfähigkeit der Photorezeptoren ermöglicht es, dass Lichtreize verarbeitet werden können, deren Intensität sich um mehrere Größenordnungen unterscheidet. Durch die Adaptionsfähigkeit werden bei Unterbrechung der Drehung des Polarisationsfilters während der Beobachtung der Haidinger-Büschel diese innerhalb weniger Sekunden unsichtbar. Deshalb muss die Polarisationsfolie zur Beobachtung der Figur ständig gedreht werden. Neben den Haidinger-Büscheln werden oft blaue Bereiche wahrgenommen, die durch einen simultanen Farbkontrast entstehen (Falk 1990).

Ergebnis: Das menschliche Auge kann polarisiertes Licht von unpolarisiertem Licht unterscheiden und sogar die Polarisationsrichtung des polarisiertem Lichts bestimmen.

Anmerkung: Ähnlich wie bei den Insekten ist ein Farbpigment, das in einer Zellschicht den Photorezeptoren vorgelagert ist, für die Wahrnehmung von polarisiertem Licht verantwortlich. Da die Farbe und die örtliche Verteilung der Haidinger-Büschel ihre Ursache im Aufbau der Netzhaut im Bereich des Gelben Flecks haben, werden die Haidinger-Büschel in der Augenheilkunde zur Beurteilung von Makulaschäden benutzt. Von Interesse sind die Haidinger-Büschel bei Patienten mit Medientrüben, bei denen die Betrachtung der Netzhaut erschwert ist (Dodt 1994).

Wenn man im Beobachten der Haidinger-Büschel mit Hilfe eines Polarisationsfilters geübt ist, können die Haidinger-Büschel auch ohne jegliches Hilfsmittel beobachtet werden. Dazu bietet sich das polarisierte Himmelslicht an, das auch Insekten zu ihrer Orientierung nutzen. In einem Winkel von 90° zur Sonne ist das Licht des wolkenlosen, blauen Himmels fast vollständig polarisiert. Blickt man einige Minuten in diese Richtung und bewegt dabei den Kopf hin und her, können die Haidinger-Büschel auch ohne Hilfsmittel, nur mit dem bloßen Auge, am Himmel entdeckt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Haidinger-Büschel ohne Hilfsmittel zu beobachten, bietet sich durch das durch Reflexion an einer glatten Oberfläche unter dem Brewster-Winkel entstehende polarisierte Licht. Allerdings erfordern diese Versuche viel Geduld und Übung, da der Reiz, den das „Polarisationssehen“ auslöst, relativ schwach ist.

Zusammenfassend können am Ende dieser Unterrichtseinheit die Gemeinsamkeiten bei der Absorption von Licht durch die Sehzellen der Insekten und Menschen und den Polarisationsfilter herausgearbeitet werden. Der physikalische Mechanismus der Absorption ist bei allen drei Vorgängen derselbe. Das verbindende physikalische Prinzip liegt in der selektiven Absorption der Sehpigmentmoleküle in den Photorezeptoren bzw. der Polymerketten des Polarisationsfilters. Das Hertzsche Dipol-Modell kann in allen drei Fällen als übergeordnetes Modell zur Beschreibung dieses physikalischen Vorgangs herangezogen werden. Dies ist ein Beispiel dafür, dass verschiedenen Vorgängen derselbe physikalische Mechanismus zu Grunde liegt, der mit demselben physikalischen Modell beschrieben werden kann.

An dieser Stelle des Unterrichtsverlaufes wäre es möglich, den Unterrichtsverlauf zu beenden, wenn es der Lehrkraft mit ihrem Unterricht darum geht, das Thema „Polarisation von Licht“ innerhalb eines Kontextes zu behandeln. Im weiteren Verlauf des Unterrichtsvorschlages wird das Modell des elektrischen Feldvektors und dessen Komponentenzerlegung bis hin zu einer Einführung in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien ausgebaut.

5.3 Klassische Polarisationsexperimente

Bisher wurde die Intensität des polarisierten Lichts von den Schülerinnen und Schülern qualitativ als Helligkeit auf einem Schirm beobachtet. Im Folgenden wird die Intensität des Lichts mit einer Photozelle quantitativ gemessen.

5.3.1 Malussches Gesetz

Experiment: Unpolarisiertes Licht einer Experimentierleuchte durchdringt zwei Polarisationsfilter und trifft anschließend auf eine Photozelle. Die Photozelle erzeugt eine der Strahlungsleistung pro Fläche proportionale Stromstärke, die von einem Messgerät in der Einheit μA angezeigt wird. Die Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters zeigt in Richtung 0° und wird während des Versuchs nicht verändert. Die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters wird langsam um 360° gedreht. Die Ausgangsintensität I_0 , die den zweiten Polarisationsfilter erreicht, beträgt $30 \mu\text{A}$. Der schematische Aufbau dieses Experiments ist in Abbildung 34 dargestellt.

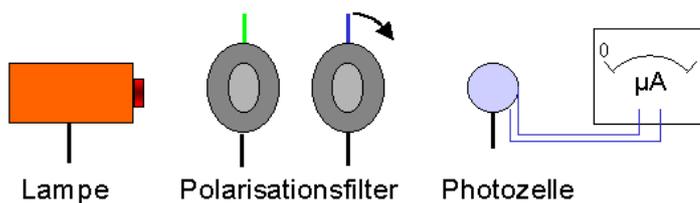


Abbildung 34: Schematischer Versuchsaufbau zur quantitativen Messung.

Beobachtung: Genau wie in den qualitativen Experimenten variiert die durch die Polarisationsfilter durchgehende Intensität, während der zweite Polarisationsfilter gedreht wird. Wird der Winkel α zwischen den Durchlassachsen von 0° auf 90° vergrößert, so verkleinert sich die Stromstärke, die als Maß für die Lichtintensität verwendet wird. Zwischen 90° und 180° nimmt der Messwert wieder zu. Wird der Winkel weiter vergrößert, wiederholt sich die Ab- bzw. Zunahme der gemessenen Intensität. Die Schülerinnen und Schüler erkennen bei der Durchführung des Experiments, dass zwischen der Änderung der Intensität und der Größe des Winkels α kein linearer Zusammenhang besteht: Während des Drehens der Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters erkennen die Schülerinnen und Schüler, dass sich die Intensität in einem Winkelbereich von $0^\circ < \alpha < 60^\circ$ nur wenig verringert. Wird die Durchlassachse weitergedreht, so ist in dem Winkelbereich $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ eine deutlich stärkere Abnahme der Intensität bis zur vollständigen Verdunklung zu beobachten.

Frage: Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Winkel α und der gemessenen Intensität?

Beobachtung: Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für eine im Unterricht aufgenommene Messreihe, in der die durch die Photozelle gemessene Intensität I_α in Abhängigkeit des Winkels α zwischen den Durchlassachsen der beiden Polarisationsfilter bestimmt wurde.

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
α [°]	$\cos \alpha$	I_α [μA]	$I_\alpha / \cos \alpha$	$I_\alpha / \cos^2 \alpha$
0	1	30	30	30
15	0,97	28	28,9	29,8
30	0,87	23	26,4	30,4
45	0,71	15	21,1	29,8
60	0,5	7,5	15	30
75	0,26	2	7,7	29,6
90	0	0		

Tabelle 1: Messwerttabelle, aus der der Zusammenhang zwischen I_α und $\cos \alpha$ hervorgeht.

Spalte 1 zeigt die Größe des Winkels α zwischen den Durchlassachsen, die bei jeder Messung um 15° vergrößert wird. In Spalte 3 ist die zu dem jeweiligen Winkel gemessene Intensität I_α eingetragen. Eine mögliche Proportionalität zwischen dem Winkel und der Intensität wird in den Spalten 4 und 5 überprüft. Dabei wird in Spalte 4 die bereits beobachtete Nichtlinearität zwischen I_α und α bestätigt. In Spalte 5 wird mit dem Quotienten

$\frac{I_\alpha}{\cos^2 \alpha}$ eine weitere Proportionalität überprüft, aus der sich $\frac{I_\alpha}{\cos^2 \alpha} = \text{konst.} = I_0$ ergibt, so

dass ein quadratischer Zusammenhang $I_\alpha \sim \cos^2 \alpha$ gefunden wird.

Ergebnis: Aus der quantitativen Messung wird der quadratische Zusammenhang $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$ zwischen dem Kosinus des Winkels α und der durchgehenden Intensität I_α ermittelt. Dieser Zusammenhang wird als das Malussche Gesetz bezeichnet.

Anmerkung: Das Gesetz $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$ ist nach dem Franzosen Etienne Malus benannt worden, der diesen Zusammenhang bei Untersuchungen zum polarisiertem Licht fand und 1809 veröffentlichte (Hecht 1989, S. 294).

Frage: Wie groß ist die Intensität von Licht, das durch eine ganze Reihe von Polarisationsfiltern mit unterschiedlichen Stellungen der Durchlassachsen hindurchtritt?

5.3.1.1 Anwendung des Malusschen Gesetzes

Experiment: Licht durchdringt, wie in Abbildung 35 schematisch dargestellt, mehrere Polarisationsfilter. Die Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters steht in Richtung 0° . Die Durchlassachsen der folgenden Polarisationsfilter sind um jeweils 30° zur Durchlassachse des vorhergehenden Polarisationsfilters gedreht. Damit sind der erste und der vierte Polarisationsfilter gekreuzt.

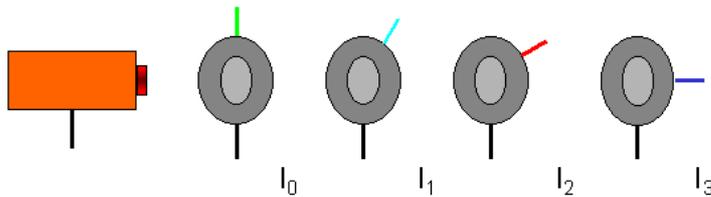


Abbildung 35: Licht durchdringt mehrere Polarisationsfilter.

Beobachtung: Obwohl der erste und der letzte Polarisationsfilter gekreuzt sind, durchdringt Licht die Anordnung. Allerdings nimmt die Intensität hinter jedem Polarisationsfilter ab.

Erklärung: Die Intensität hinter jedem Polarisationsfilter kann mit Hilfe des Malusschen Gesetzes $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$ berechnet werden, wobei α der Winkel zwischen den aufeinanderfolgenden Durchlassachsen ist.

Mit $\alpha_i = 30^\circ$ ergibt sich: $I_1 = I_0 \cdot \cos^2 \alpha_1$.

Für I_2 ergibt sich: $I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \alpha_2 = I_0 \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \cos^2 \alpha_2$.

Für I_3 ergibt sich: $I_3 = I_2 \cdot \cos^2 \alpha_3 = I_0 \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \cos^2 \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_3$.

Ergebnis: Die Intensität des Lichts, das eine Reihe von Polarisationsfiltern durchläuft, kann mit Hilfe des Malusschen Gesetzes berechnet werden aus: $I_{ges.} = I_0 \cdot \prod_i \cos^2 \alpha_i$.

Anmerkung: Eine Beschreibung dieses Vorganges auf der Modellebene wurde bereits in Kapitel 5.1.1 durch die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors gegeben, wobei der lineare Zusammenhang $|\vec{E}_\alpha| = |\vec{E}_0| \cdot |\cos \alpha|$ herausgearbeitet wurde. Im nächsten Abschnitt wird als Verbindung zwischen der durchgeführten Messung und der Modellbeschreibung eine Proportionalität zwischen der Intensität und dem elektrischen Feldvektor ermittelt.

5.3.1.2 Zusammenhang zwischen Intensität und elektrischem Feldvektor

Beobachtung: In Tabelle 2 werden verschiedene mögliche Proportionalitäten zwischen I_α und $|\vec{E}_\alpha|$ überprüft. Die Länge des elektrischen Feldvektors \vec{E}_α (Spalte 4) wird berechnet, wobei die Länge von \vec{E}_0 mit 10 Skalenteilen (SkT) vorgegeben wird.

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6	Spalte 7
α [°]	$\cos \alpha$	I_α [µA]	$ \vec{E}_\alpha = \vec{E}_0 \cdot \cos \alpha$ [SkT]	$I_\alpha / \vec{E}_\alpha $	$ \vec{E}_\alpha ^2$	$I_\alpha / \vec{E}_\alpha ^2$
0	1	30	10	3	100	0,30
15	0,97	28	9,7	2,89	94,09	0,30
30	0,87	23	8,7	2,64	75,69	0,30
45	0,71	15	7,1	2,11	50,41	0,30
60	0,5	7,5	5,0	1,5	25,0	0,30
75	0,26	2	2,6	0,77	6,76	0,30
90	0	0	0		0	

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen I_α und $|\vec{E}_\alpha|$.

Es zeigt sich, dass der Quotient $I_\alpha / |\vec{E}_\alpha|$ keine Konstante ergibt und damit kein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht (Spalte 5). In Spalte 7 wird die Proportionalität zwischen I_α und $|\vec{E}_\alpha|^2$ überprüft und bestätigt, so dass sich $I_\alpha \sim |\vec{E}_\alpha|^2$ ergibt.

Mit $|\vec{E}_\alpha| = |\vec{E}_0| \cdot \cos \alpha$ ergibt sich für die Intensität:

$$I_\alpha = \text{konst.} \cdot |\vec{E}_\alpha|^2 = \text{konst.} \cdot |\vec{E}_0|^2 \cdot \cos^2 \alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha.$$

Ergebnis: Zwischen der gemessenen Intensität I_α und der Länge des elektrischen Feldvektors \vec{E}_α besteht ein quadratischer Zusammenhang: $I_\alpha \sim |\vec{E}_\alpha|^2$.

Anmerkung: Der quadratische Zusammenhang wird innerhalb der Deutung der Polarisationsexperimente in der Photonenvorstellung wieder aufgegriffen. Bisher wurden Polarisations-

experimente betrachtet, in denen die Polarisationsfilter hintereinander angeordnet waren. Das polarisierte Licht wurde dabei mit dem elektrischen Feldvektor beschrieben und die Intensität mit dem Malusschen Gesetzes berechnet. Im weiteren Verlauf des Unterrichtsvorschlages werden Polarisationsexperimente betrachtet, in denen polarisiertes Licht überlagert wird.

5.3.2 Überlagerung von polarisiertem Licht

Anmerkung: Die folgenden Experimente werden mit einem Michelson-Interferometer und Laserlicht durchgeführt. Dabei wird vorausgesetzt, dass den Schülern die Beschreibung der Interferenzexperimente in der Wellentheorie bekannt ist. In allen Experimenten dieses Kapitels bleibt der Wegunterschied des sich überlagernden Lichts konstant. Das Augenmerk dieser Experimente liegt auf der Überlagerung von verschieden polarisiertem Licht und den damit verbundenen Auswirkungen auf das Interferenzmuster. Als Lichtquelle wird ein Laser benutzt, dessen Licht bereits polarisiert ist. Das Laserlicht wird in allen Experimenten durch eine Sammellinse aufgeweitet, die der Übersicht halber nicht in die schematischen Abbildungen eingezeichnet ist. Das Interferenzmuster wird auf einem Schirm qualitativ beobachtet.

Experiment: Laserlicht wird durch einen Strahlteiler im Michelson-Interferometer in zwei Wege geteilt, am Spiegel reflektiert und durch den Strahlteiler wieder zusammengeführt (siehe Abbildung 36). Die Überlagerung des Lichts aus den beiden Gängen des Interferometers führt zu einem Interferenzmuster, das auf einem Schirm beobachtet werden kann. Die beiden Gänge des Interferometers werden mit Gang 1 bzw. Gang 2 gekennzeichnet. Das Laserlicht ist in Richtung 0° polarisiert.

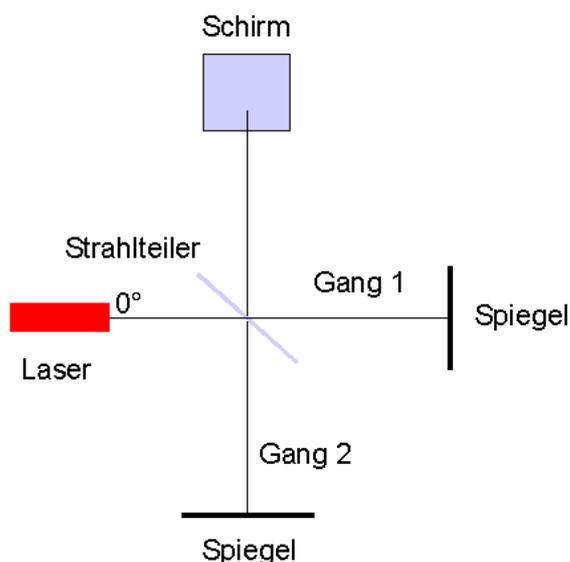


Abbildung 36: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers.

Beobachtung: Auf dem Schirm ist ein Interferenzmuster aus konzentrischen Kreisen zu beobachten, wie es in Abbildung 37 dargestellt ist.

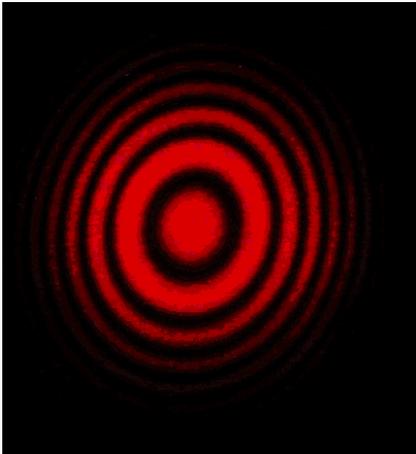


Abbildung 37: Interferenzmuster ohne Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers.

Experiment: In jeden Gang des Interferometers wird ein Polarisationsfilter gestellt, dessen Durchlassachse in Richtung 0° zeigt (siehe Abbildung 38). Die Polarisationsrichtung des Laserlichtes liegt ebenfalls in Richtung 0° .

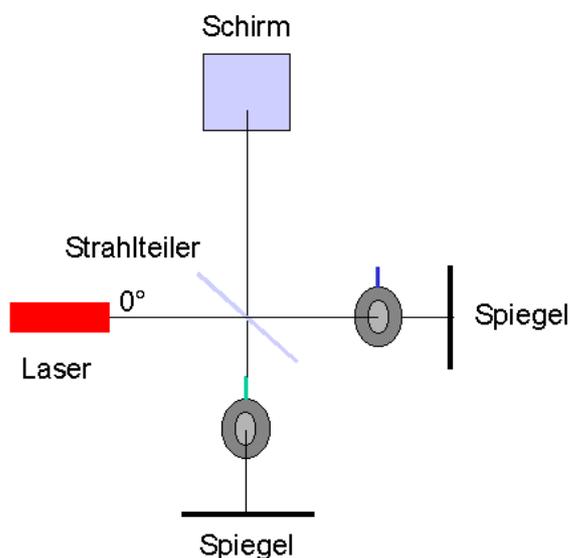


Abbildung 38: Parallele Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers.

Beobachtung: Das auf dem Schirm zu beobachtende Interferenzmuster entspricht dem in Abbildung 37. Lediglich die Intensität des Lichts hat etwas abgenommen.

Experiment: In Abbildung 39 ist dargestellt, wie ein dritter Polarisationsfilter, der zwischen das Interferometer und den Schirm gestellt wird, die Polarisationsrichtung des wieder zusammengeführten Lichts überprüft.

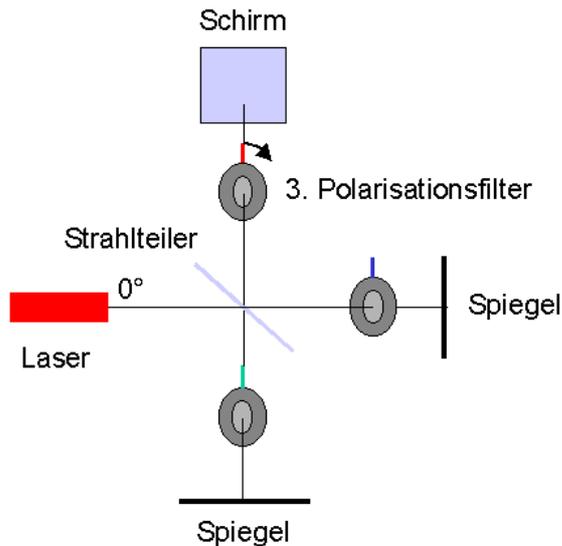


Abbildung 39: Ein dritter Polarisationsfilter überprüft die Polarisationsrichtung des zusammengeführten Lichts.

Beobachtung: Ist die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters gekreuzt zu den Polarisationsfiltern in den Gängen des Interferometers, wird das Laserlicht vollständig ausgelöscht. Damit ist auch das Interferenzmuster verschwunden. Bei paralleler Stellung des dritten Polarisationsfilters ist das Interferenzmuster dagegen vorhanden.

Experiment: Wie in Abbildung 40 dargestellt, wird in Gang 1 des Interferometers ein Polarisationsfilter mit der Durchlassachse in Richtung 0° gestellt. In Gang 2 steht ein Polarisationsfilter mit einer dazu gekreuzten Durchlassachse. Die Polarisation des Laserlichtes ist in Richtung 45° , um nach dem Durchgang des Lichts durch die Polarisationsfilter die gleiche Intensität in den Gängen zu erhalten.

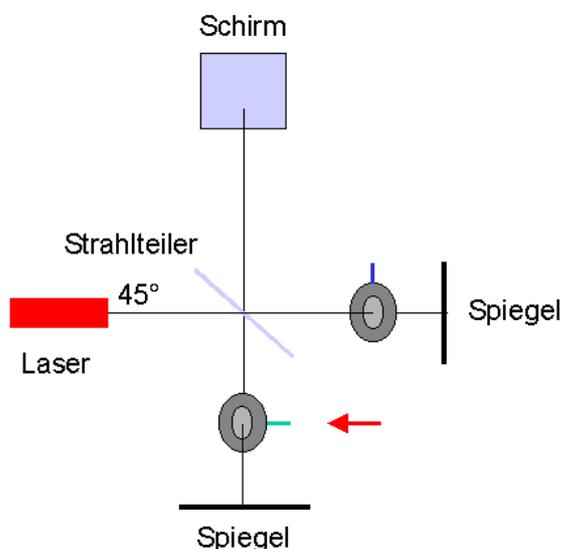


Abbildung 40: Gekreuzte Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers.

Beobachtung: Abbildung 41 zeigt, dass auf dem Schirm eine gleichmäßige Ausleuchtung und kein Interferenzmuster zu beobachten ist.

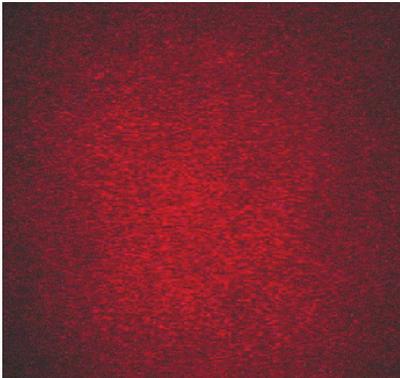


Abbildung 41: Schirmbild bei gekreuzten Polarisationsfiltern in den Gängen des Interferometers.

Experiment: Ein dritter Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse zunächst parallel zu einer der Polarisationsrichtungen der beiden Gänge ist, wird zwischen das Interferometer und den Schirm gestellt (siehe Abbildung 42).

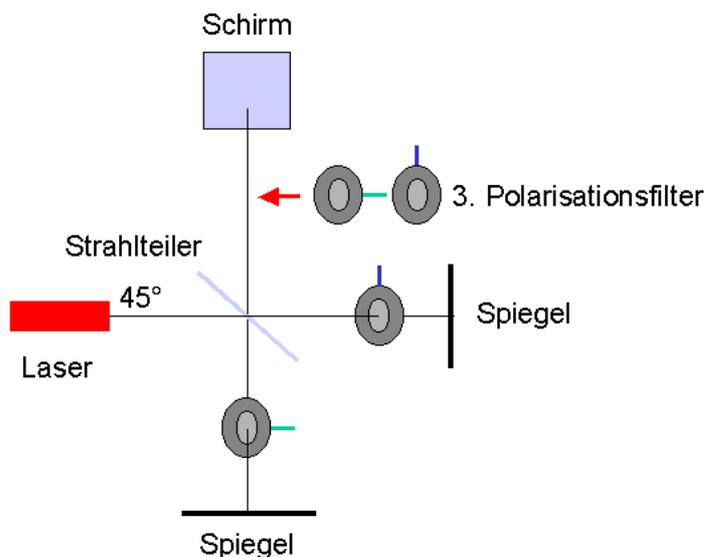


Abbildung 42: Ausblendung eines der beiden Gänge durch einen dritten Polarisationsfilter.

Beobachtung: Das Ausblenden der Intensität einer der beiden Gänge durch den gekreuzten dritten Polarisationsfilter zeigt qualitativ, dass die Intensitäten der beiden Gänge gleich groß sind. Es ist zu erkennen, dass die auf den Schirm auftreffende Intensität ohne den dritten Polarisationsfilter sich aus der Summe der Einzelintensitäten zusammensetzt.

Ergebnis: Bei der Überlagerung von senkrecht zueinander polarisiertem Licht entsteht kein Interferenzmuster. Die Intensität, die auf dem Schirm beobachtet wird, ist die Summe der Einzelintensitäten aus den beiden Gängen: $I_{ges} = I_1 + I_2$.

Experiment: Die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters steht, wie in Abbildung 43 dargestellt, in Richtung 45° .

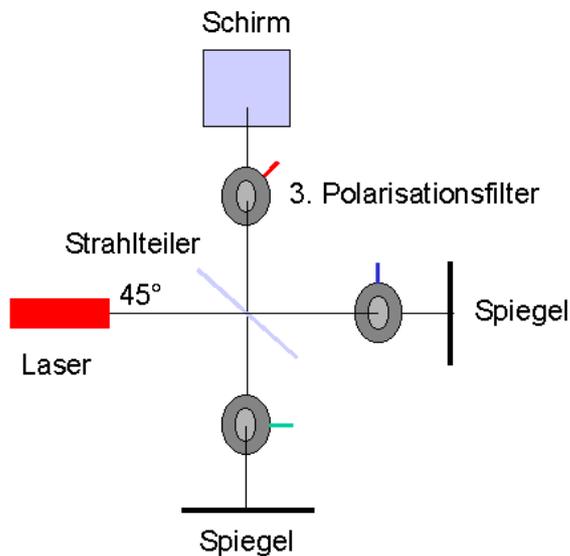


Abbildung 43: Dritter Polarisationsfilter mit Durchlassachse in Richtung 45° .

Beobachtung: Auf dem Schirm entsteht ein Interferenzmuster. Abbildung 44 zeigt das Schirmbild, das sich nur durch eine geringere Intensität des Lichtes von dem Interferenzbild bei paralleler Polarisation aus Abbildung 37 unterscheidet.

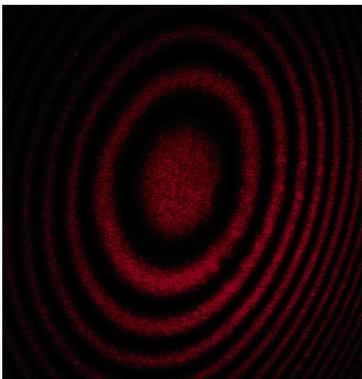


Abbildung 44: Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters in Richtung 45° .

Erklärung: Nur die parallel polarisierten Anteile des sich überlagernden Lichts bilden ein Interferenzmuster. Senkrecht zueinander polarisiertes Licht interferiert nicht. Der dritte Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in Richtung 45° steht, projiziert die Polarisationsrichtungen der beiden Gänge auf seine Durchlassachse, wie in der graphischen Konstruktion der elektrischen Feldvektoren in Abbildung 45 schematisch dargestellt ist.

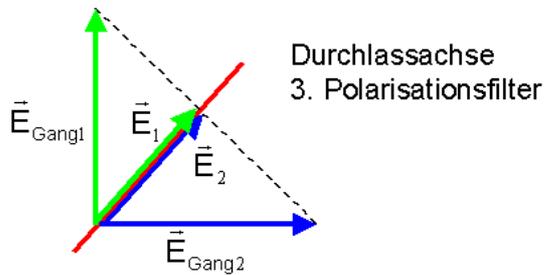
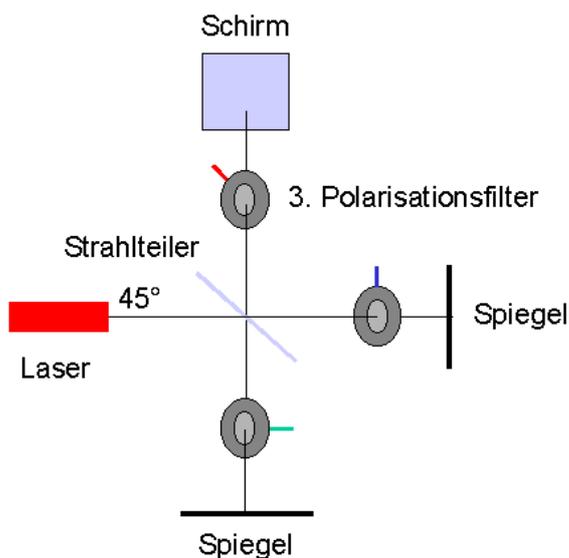


Abbildung 45: Konstruktion der elektrischen Feldvektoren.

Ergebnis: Nur parallel polarisierte Anteile des Lichts interferieren. Durch einen dritten Polarisationsfilter kann man die senkrecht zueinander polarisierten Anteile des Lichts, „interferenzfähig“ machen.

Experiment: Der dritte Polarisationsfilter wird um 90° gedreht, so dass seine Durchlassachse in Richtung -45° steht (siehe Abbildung 46).

Abbildung 46: Dritter Polarisationsfilter mit Durchlassachse in Richtung -45° .

Beobachtung: Auf dem Schirm ist ein Interferenzmuster zu beobachten (siehe Abbildung 47). Allerdings ist an der Stelle des Maximums im Zentrum des in Abbildung 44 dargestellten Interferenzbildes nun ein Minimum.

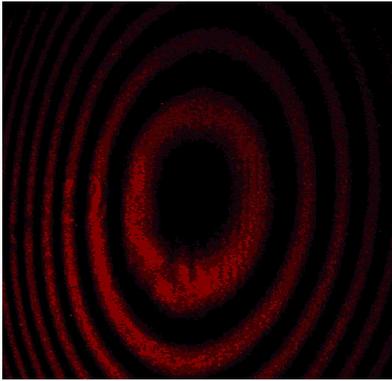


Abbildung 47: Dritter Polarisationsfilter in Richtung -45° . Anstelle des zentralen Maximums in Abbildung 44 befindet sich im Zentrum des Interferenzmusters ein Minimum.

Frage: Warum wechseln Maximum und Minimum an einer festen Stelle des Interferenzbildes?

Erklärung: Die Komponentenzersetzung der elektrischen Feldvektoren dieser beiden Experimente führt zu einer Beschreibung dieser Experimente. Abbildung 48 zeigt die Konstruktion der elektrischen Feldvektoren für das in Abbildung 43 dargestellte Experiment, in dem die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters in Richtung $+45^\circ$ steht.

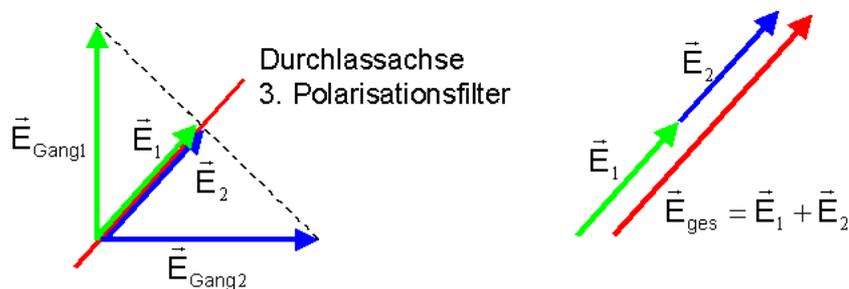


Abbildung 48: Konstruktion der elektrischen Feldvektoren für Durchlassachse in Richtung $+45^\circ$.

Die elektrischen Feldvektoren, die die Polarisationsrichtungen aus Gang 1 und Gang 2 beschreiben, werden auf die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters projiziert, die in Richtung 45° steht. Nach der Projektion sind die Komponenten \vec{E}_1 und \vec{E}_2 parallel zueinander. Das Maximum im Zentrum der Interferenzfigur in Abbildung 44 lässt sich durch die Addition der beiden Vektoren erklären. Das Quadrat der Länge des resultierenden Vektors \vec{E}_{ges} ist proportional zur Intensität des Maximums, die auf dem Schirm beobachtet wird.

In Abbildung 49 ist die Konstruktion der sich überlagernden elektrischen Feldvektoren für den in Abbildung 46 dargestellten Versuch gezeigt, in dem die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters um 90° gedreht wurde und in Richtung -45° steht.

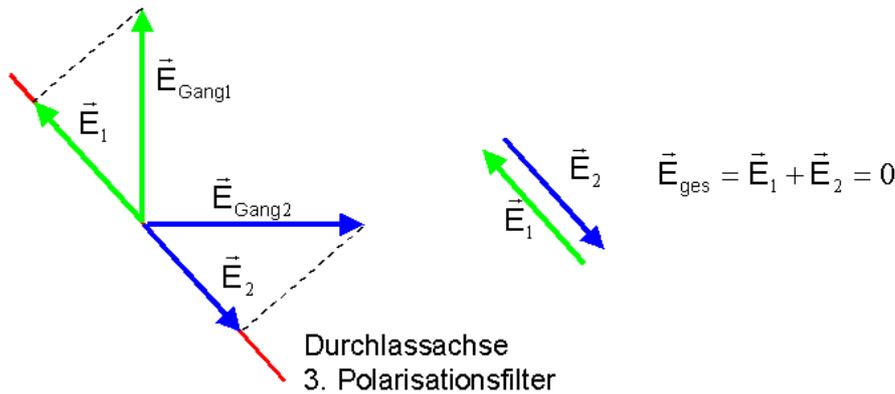


Abbildung 49: Konstruktion der elektrischen Feldvektoren für Durchlassachse in Richtung -45° .

Aus der Projektion der elektrischen Feldvektoren aus Gang 1 und Gang 2 auf die Durchlassachse des 3. Polarisationsfilters wird ersichtlich, dass die Richtungen der elektrischen Feldvektoren antiparallel sind. Addiert man die Vektoren, so ergibt die Summe null. Das bedeutet, dass auch die Intensität null ist und zu einem Minimum in der Mitte des Interferenzbildes in Abbildung 47 führt.

Ergebnis: Zur Erklärung des Interferenzbildes bei unterschiedlicher Stellung der Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters müssen die elektrischen Feldvektoren betrachtet werden. Die Addition der projizierten Komponenten der elektrischen Feldvektoren ergibt einen resultierenden Vektor: $\vec{E}_{\text{ges}} = \sum_i \vec{E}_i$. Da $I \sim \vec{E}^2$ kann die Intensität an einer Stelle des Interferenzbildes beschrieben werden durch: $I \sim (\sum_i \vec{E}_i)^2$ und führt damit zu einer Beschreibung der beobachteten Interferenzbilder.

Anmerkung: Bis zu dieser Stelle des Unterrichtsvorschlages wurden die Polarisationsexperimente auf der Grundlage der klassischen Wellenvorstellung von Licht mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben. In den folgenden Kapiteln werden die bisher durchgeführten Polarisationsexperimente in einer Photonenvorstellung von Licht beschrieben, um in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien einzuführen. An dieser Stelle bietet sich die Möglichkeit, den Unterrichtsgang zu beenden, wenn es der unterrichtenden Lehrkraft nicht um eine Einführung in die Quantenphysik geht.

5.4 Polarisierung in der Photonenvorstellung

Im weiteren Verlauf des Unterrichtsganges werden die Experimente, die in den vorangegangenen Kapiteln real durchgeführt wurden, als Gedankenexperimente nochmals durchdacht und in der Photonenvorstellung interpretiert. Anstelle der Beobachtung tritt die Überlegung, durch die ein Weg zur Beschreibung der Gedankenexperimente gefunden werden soll. Die Vorgehensweise und die Definition der Begriffe in diesem Kapitel gehen auf Ideen von Heinrich Mitter (Mitter 1969) sowie Alto Brachner und Richard Fichtner (Brachner 1977) zurück.

5.4.1 Der Polarisationszustand

Anmerkung: Für den weiteren Verlauf des Unterrichtsganges wird vorausgesetzt, dass den Schülerinnen und Schülern der Photoeffekt und die Beschreibung des Lichts in der Photonenvorstellung mit der Beziehung $E = h \cdot f$ (E : Energie; h : Plancksches Wirkungsquantum; f : Frequenz) bekannt ist. Die Intensität des Lichts lässt sich ausdrücken als Strahlungsleistung pro Fläche: $I = \frac{P}{A}$, wobei P die Strahlungsleistung ist, die auf die Fläche A der Photozelle trifft. Mit $P = \frac{E}{t}$ ergibt sich die Formel: $I = \frac{h \cdot f}{t \cdot A} \cdot n$. Die Intensität lässt sich somit durch die Anzahl n der Photonen, die pro Zeiteinheit t auf die Fläche A der Photozelle treffen, beschreiben.

Mit den Erkenntnissen aus dem Photoeffekt und den bereits durchgeführten Polarisationsexperimenten ergibt sich folgende Frage:

Frage: Lassen sich die durchgeführten Polarisationsexperimente auch in der Photonenvorstellung von Licht beschreiben?

Gedankenexperiment: Photonen durchdringen einen Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in 0° -Richtung steht (siehe Abbildung 50).

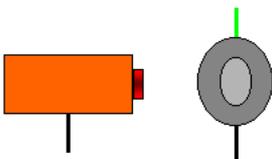


Abbildung 50: Erstes Gedankenexperiment zur Polarisierung von Photonen.

Frage: Sind alle Photonen nach dem Durchgang durch den Polarisationsfilter gleich polarisiert, und kann man einem einzelnen Photon die Eigenschaft Polarisation zuschreiben?

Überlegung: Mit einem zweiten Polarisationsfilter kann überprüft werden, ob alle Photonen identisch polarisiert sind. Sind beide Durchlassachsen der Polarisationsfilter, wie in Abbildung 51 (a) dargestellt, parallel zueinander angeordnet, so ergibt sich die Intensität I_α hinter dem zweiten Polarisationsfilter rechnerisch nach dem Malusschen Gesetz zu $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$. Da $\alpha = 0^\circ$, ist $I_\alpha = I_0$. Das bedeutet, dass alle Photonen den zweiten Polarisationsfilter passieren und somit alle Photonen identisch polarisiert sind.

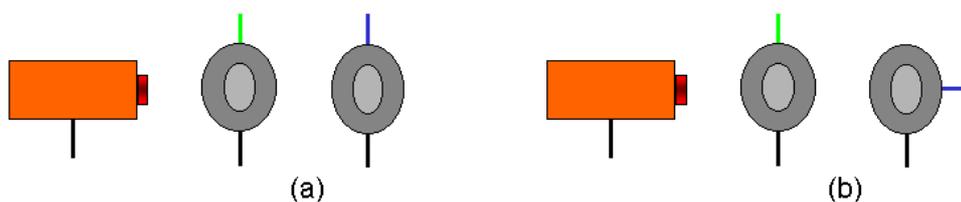


Abbildung 51: Zweites Gedankenexperiment zur Polarisation von Photonen.

Eine weitere Möglichkeit zu überprüfen, ob alle Photonen gleich polarisiert sind, ist in Abbildung 51 (b) dargestellt. Die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters steht senkrecht zu der des ersten Filters. Nach dem Malusschen Gesetz ergibt sich für I_α bei $\alpha = 90^\circ$: $I_\alpha = 0$. Dies kann so gedeutet werden, dass kein Photon den gekreuzten Polarisationsfilter durchdringt, da alle Photonen gleich polarisiert sind.

Ergebnis: Alle Photonen sind nach dem ersten Polarisationsfilter gleich polarisiert und verhalten sich am zweiten Polarisationsfilter identisch. Dabei wird von der Polarisation vieler Photonen auf das einzelne Photon geschlossen, ohne tatsächlich ein einzelnes Photon zu messen. Die Polarisation eines einzelnen Photons wird bestimmt aus der Betrachtung vieler Photonen, die sich identisch verhalten. Jedes Photon eines „Photonenstroms“ mit einer bestimmten Polarisationsrichtung befindet sich in diesem definierten Polarisationszustand.⁹ Eine Aussage über die Polarisation eines einzelnen Photons wird demzufolge getroffen aus dem identischen Verhalten einer großen Anzahl von ununterscheidbaren Photonen.

Frage: Was passiert mit dem Polarisationszustand von Photonen, die zwei Polarisationsfilter durchdringen, deren Durchlassachsen weder parallel noch gekreuzt zueinander sind?

⁹ Diese Definition lehnt sich an die Formulierung von Heinrich Mitter an (Mitter 1969, S. 15).

Gedankenexperiment: Photonen durchdringen zuerst einen Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in 0° -Richtung steht und anschließend einen Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in Richtung 30° steht.

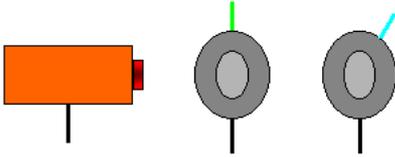


Abbildung 52: Drittes Gedankenexperiment zur Polarisation von Photonen

Überlegung: Die Intensität hinter dem zweiten Polarisationsfilter ist kleiner als die auf ihn auftreffende Intensität. Das bedeutet, dass die Anzahl der Photonen, die auf die Photozelle treffen, sich verringert hat. Im Gegensatz zum vorangegangenen Gedankenexperiment verhalten sich die Photonen am zweiten Polarisationsfilter nicht gleich. Einige Photonen durchdringen den zweiten Polarisationsfilter, andere nicht.

Frage: Was bedeutet das für den Polarisationszustand, der für alle Photonen hinter dem ersten Polarisationsfilter identisch zu sein schien?

Überlegung: Der Polarisationszustand der Photonen muss offenbar differenzierter betrachtet werden. Die Photonen verhalten sich nur dann gleich, wenn die Durchlassachsen des ersten und zweiten Polarisationsfilters in die gleiche Richtung zeigen. An einem Polarisationsfilter mit einer anderen Stellung der Durchlassachse verhalten sich die Photonen nicht gleich. Das Verhalten der Photonen hängt offensichtlich nicht nur von ihrem Polarisationszustand ab, sondern wird auch durch die Anordnung der Durchlassachsen der Polarisationsfilter bestimmt.

Gedankenexperiment: Ein dritter Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in Richtung 30° steht, wird zu der Anordnung hinzugefügt (siehe Abbildung 53).

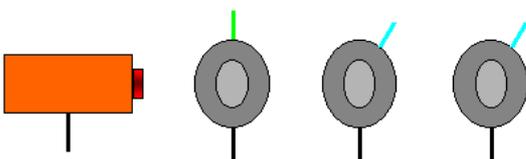


Abbildung 53: Viertes Gedankenexperiment zur Polarisation von Photonen.

Überlegung: Die Intensität vor und hinter dem dritten Polarisationsfilter ist gleich. Das bedeutet, dass alle Photonen, die den dritten Polarisationsfilter durchdringen, sich gleich verhalten. Der Polarisationszustand der Photonen hat sich durch den zweiten Polarisationsfilter geändert, so dass die Photonen in einem durch die Stellung der Durchlassachse des

zweiten Polarisationsfilters definierten Zustand sind. Der dritte identische Polarisationsfilter bestätigt diesen Polarisationszustand.

Ergebnis: Ein Polarisationsfilter erzeugt polarisiertes Licht, das als „Photonenstrom“ gedeutet werden kann, dessen Photonen den jeweiligen Polarisationszustand annehmen. Eine Information über das einzelne Photon erhält man aus dem identischen Verhalten vieler Photonen. Der Polarisationszustand der Photonen wird durch einen Polarisationsfilter mit identischer Durchlassachse bestätigt. Ein nicht identischer Polarisationsfilter verändert den Polarisationszustand der Photonen immer. Über den Polarisationszustand der Photonen vor dem ersten Polarisationsfilter kann keine Aussage getroffen werden.

Anmerkung: Diese Ergebnisse in Bezug auf den Polarisationszustand von Photonen können auf weitere physikalische Größen und Objekte übertragen werden und führen so zu einem allgemeineren Zustandsbegriff: Der Zustand eines einzelnen Objektes wird durch eine Gesamtheit von ununterscheidbaren Objekten bestimmt. Die Ununterscheidbarkeit der Objekte wird dabei durch die gezielte Beeinflussung durch die physikalische Messanordnung hergestellt. Dieses Vorgehen entspricht der Methode, mit der Aussagen über ein Einzelobjekt in der Quantenphysik aufgestellt werden können.¹⁰

Frage: Wie viele Photonen durchdringen den zweiten Polarisationsfilter in dem Versuch gemäß Abbildung 52?

5.4.2 Die Wahrscheinlichkeit in der Quantenphysik

Anmerkung: Die Antwort auf die vorangestellte Frage führt zum Wahrscheinlichkeitsbegriff, mit dem in der Quantenphysik Einzelphotonenexperimente gedeutet werden können.

Gedankenexperiment: Photonen durchdringen zuerst einen Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse in 0° -Richtung steht und anschließend einen Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse um einen Winkel $\alpha = 30^\circ$ gedreht ist (siehe Abbildung 54).

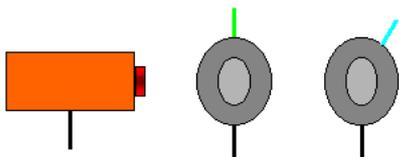


Abbildung 54: Gedankenexperiment zum Wahrscheinlichkeitsbegriff.

¹⁰ Diese Definition lehnt sich an die Formulierung von Brachner und Fichtner (Brachner 1977, S. 20ff) an.

Überlegung: Die Intensität hinter dem ersten Polarisationsfilter kann ausgedrückt werden durch: $I_0 = \frac{h \cdot f}{t \cdot A} \cdot n_0$ (siehe Kapitel 5.4.1). Die Intensität hinter dem zweiten Polarisationsfilter

wird beschrieben durch: $I_\alpha = \frac{h \cdot f}{t \cdot A} \cdot n_\alpha$.

Mit Hilfe des Malusschen Gesetzes, das bereits in Kapitel 5.3.1 erarbeitet wurde, kann die Intensität hinter dem zweiten Polarisationsfilter berechnet werden aus $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$. Setzt man für I_0 und I_α die oben stehenden Gleichungen ein, so erhält man $n_\alpha = n_0 \cdot \cos^2 \alpha$. Mit dieser Formel lässt sich die Anzahl n_α der Photonen hinter dem Polarisationsfilter berechnen.

Beispiel: $n_0 = 1000$ Photonen, $\alpha = 30^\circ$. Für die durchgelassene Anzahl der Photonen ergibt sich: $n_\alpha = 1000 \cdot \cos^2 30^\circ = 750$.

Ergebnis: n_α gibt die Anzahl der Photonen an, die beim mehrmaligen Durchführen dieser Messung den zweiten Polarisationsfilter durchdringen. Damit beschreibt das Malussche Gesetz die relative Häufigkeit, mit der Photonen den zweiten Polarisationsfilter durchdringen.

Frage: Wie wird das Gedankenexperiment für ein einzelnes Photon erklärt?

Beispiel: $n_0 = 1$ Photon, $\alpha = 30^\circ$. Aus dem Malusschen Gesetz ergibt sich:

$$n_\alpha = 1 \cdot \cos^2 30^\circ = 0,75.$$

Anmerkung: Dieses Ergebnis lässt sich so deuten, dass in mehreren Messungen mit den selben Anfangsbedingungen in einigen Fällen ein Photon hinter dem zweiten Polarisationsfilter registriert wird und in den anderen Fällen nicht. In der statistischen Deutung dieses Experiments kann so mit Hilfe des Malusschen Gesetzes der Begriff der Wahrscheinlichkeit W eingeführt und berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit gibt damit an, ob ein einzelnes Photon, das sich in einem bestimmten Polarisationszustand befindet, einen weiteren Polarisationsfilter durchdringt.

Ergebnis: Aus dem Malusschen Gesetz $I_\alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$ wird bei der Betrachtung einzelner Photonen $W_\alpha = W_0 \cdot \cos^2 \alpha$, wobei α der Winkel zwischen den Durchlassachsen der Polarisationsfilter ist.

5.4.3 Der Produktsatz

Frage: Wie groß ist für ein einzelnes Photon die Wahrscheinlichkeit, eine ganze Reihe von Polarisationsfiltern mit unterschiedlichen Stellungen der Durchlassachsen zu durchdringen?

Gedankenexperiment: Ein Photon durchdringt, wie in Abbildung 55 gezeigt, mehrere Polarisationsfilter. Die Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters steht in Richtung 0° . Die Durchlassachsen der folgenden Polarisationsfilter sind um jeweils 30° zur Durchlassachse des vorhergehenden Polarisationsfilters gedreht. Damit sind der erste und der vierte Polarisationsfilter gekreuzt.

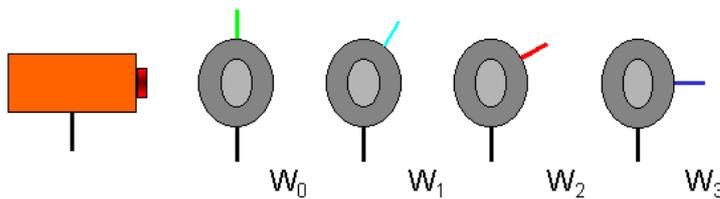


Abbildung 55: Ein Photon durchdringt mehrere Polarisationsfilter

Überlegung: Die Wahrscheinlichkeit, dass das Photon den jeweils nächsten Polarisationsfilter durchdringt, wird berechnet nach: $W_i = W_{i-1} \cdot \cos^2 \alpha_i$, wobei α_i der Winkel zwischen den aufeinanderfolgenden Durchlassachsen ist.

Anmerkung: Bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten wird nun anders verfahren, als bei der Berechnung der Intensitäten beim Durchgang durch mehrere Polarisationsfilter (siehe Kapitel 5.3.1.1). Die in Abbildung 55 mit W_1 bis W_3 bezeichneten Wahrscheinlichkeiten geben *nicht* die jeweilige Gesamtwahrscheinlichkeit an dieser Stelle wieder. Sie beschreiben die einzelnen Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein Photon den zugehörigen Polarisationsfilter durchdringt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich tatsächlich ein Photon vor dem Polarisationsfilter befindet, also die Wahrscheinlichkeit W_{i-1} gleich 1 ist. Der Wert der einzelnen Wahrscheinlichkeiten hängt daher nur von dem jeweiligen Winkel α_i ab. Diese Aussage ist gleichbedeutend damit, dass die Ereignisse an den einzelnen Polarisationsfiltern voneinander unabhängig sind. Da in dem dargestellten Experiment (siehe Abbildung 55) alle Winkel eine Größe von 30° haben, sind auch die Wahrscheinlichkeiten W_1 bis W_3 alle gleich 0,75. Für die Gesamtwahrscheinlichkeit der ganzen Anordnung ergibt sich daher ein Wert von $W_{ges} = (0,75)^3 \approx 0,42$.

Ergebnis: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon eine Reihe von Polarisationsfiltern durchläuft, setzt sich aus dem Produkt der zu den einzelnen Polarisationsfiltern gehörigen Wahrscheinlichkeiten zusammen. Setzt sich allgemein ein Ereignis aus mehreren Teilereignissen zusammen, die alle unabhängig voneinander sind, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der Einzelereignisse. Dieses Prinzip wird als Produktsatz bezeichnet: $W = \prod_i W_i$.

Anmerkung: In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Verhalten von Photonen beim Durchgang durch einen oder mehrere Polarisationsfilter, die hintereinander angeordnet waren, diskutiert. Im weiteren Verlauf des Unterrichtsganges wird das Verhalten von polarisierten Photonen in Interferenzexperimenten mit einem Michelson-Interferometer betrachtet.

5.4.4 Überlagerung von Polarisationszuständen

Anmerkung: In diesem Abschnitt sollen die in Kapitel 5.3.2 durchgeführten Versuche zur Überlagerung von polarisiertem Licht als Gedankenexperimente in der Photonenvorstellung von Licht gedeutet werden. Vorrausgesetzt wird, dass den Schülerinnen und Schülern bekannt ist, dass ein Interferenzbild auch aus einzelnen Photonen aufgebaut werden kann (Taylor-Experiment).

Gedankenexperiment: In Gang 1 des Interferometers steht ein Polarisationsfilter mit der Durchlassachse in Richtung 0° . In Gang 2 steht ein Polarisationsfilter mit einer dazu gekreuzten Durchlassachse (siehe Abbildung 56).

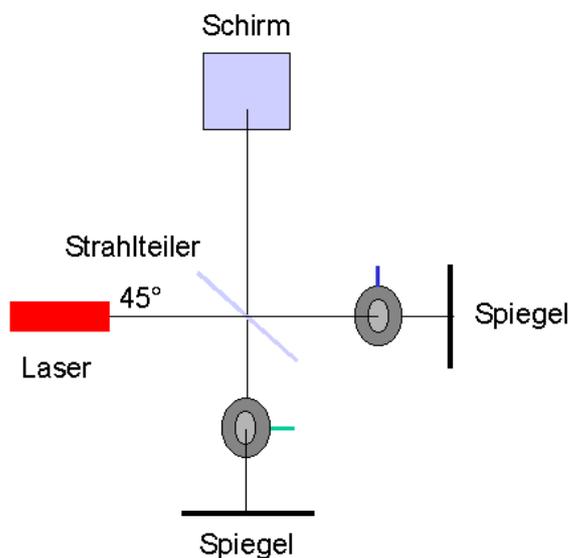


Abbildung 56: Gekreuzte Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers.

Überlegung: Das einzelne Photon durchläuft mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit W_1 entweder Gang 1 des Interferometers oder mit einer Wahrscheinlichkeit W_2 Gang 2 des Interferometers und trifft auf den Schirm.

Ergebnis: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein einzelnes Photon auf den Schirm trifft, setzt sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Gänge zusammen:

$$W_{ges} = W_1 + W_2.$$

Gedankenexperiment: Zwischen das Interferometer und den Schirm wird ein dritter Polarisationsfilter gestellt, dessen Durchlassachse in Richtung 45° bzw. -45° steht (siehe Abbildung 57).

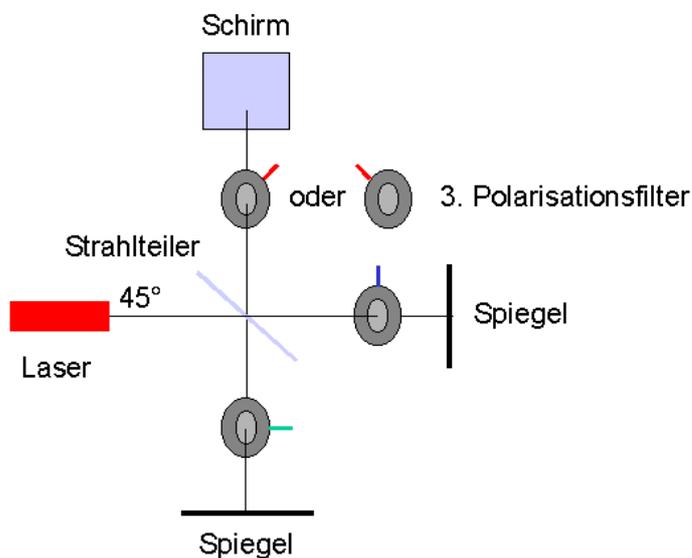


Abbildung 57: Dritter Polarisationsfilter in Richtung 45° bzw. -45° .

Überlegung: Auf dem Schirm entsteht ein Interferenzmuster, wie es in Abbildung 44 bzw. Abbildung 47 dargestellt ist. Es gibt Bereiche, in denen keine Photonen auftreffen. Das bedeutet, dass sich die Wahrscheinlichkeiten W_1 und W_2 , ein Photon an dieser Stelle zu detektieren, auslöschen müssten. Da die Wahrscheinlichkeiten stets positive Größen sind, kann ihre Summe nicht null sein.

Frage: Wie kann dieses Gedankenexperiment richtig beschrieben werden?

5.4.5 Wahrscheinlichkeitsamplitude und Superpositionsprinzip

Überlegung: In Kapitel 5.3.2 wird für die Überlagerung von polarisiertem Licht gezeigt, dass die Addition der elektrischen Feldvektoren, die in einer graphischen Konstruktion ermittelt werden, das Interferenzmuster beschreibt (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49). Analog zu

der graphischen Konstruktion mit viel Licht wird eine Konstruktion für ein einzelnes Photon durchgeführt.

Anmerkung: Anstelle des elektrischen Feldvektors, der die Schwingungsamplitude des elektromagnetischen Feldes darstellt, wird der Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude Ψ eingeführt, der das Verhalten einzelner Photonen beschreibt und dem elektrischen Feldvektor entspricht. Das Betragsquadrat der Wahrscheinlichkeitsamplitude ist, analog zum elektrischen Feldvektor und der Intensität, proportional zur Wahrscheinlichkeit:

$$|\Psi|^2 \sim W \quad : \quad W_\alpha = W_0 \cdot \cos^2 \alpha$$

$$|\vec{E}|^2 \sim I \quad : \quad I_\alpha = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Überlegung: Analog zu den elektrischen Feldvektoren in Abbildung 48 und Abbildung 49 werden die Wahrscheinlichkeitsamplituden auf die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters projiziert. Abbildung 58 zeigt die Projektion der Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ_1 aus Gang 1 und Ψ_2 aus Gang 2 auf die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters in Richtung 45° .

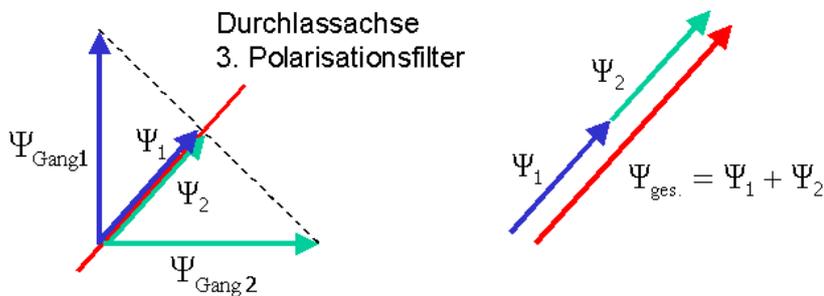


Abbildung 58: Konstruktion der Wahrscheinlichkeitsamplituden für Durchlassachse in Richtung $+45^\circ$.

Das Registrieren eines Photons im Zentrum des Interferenzbildes kann durch die Addition der beiden Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ_1 und Ψ_2 erklärt werden. Die Summe der Wahrscheinlichkeitsamplituden $\Psi_{ges.}$ ergibt eine Resultierende, deren Quadrat ein Maß für die Wahrscheinlichkeit ist.

Abbildung 59 zeigt die Konstruktion der Wahrscheinlichkeitsamplituden, bei der die Durchlassachse des 3. Polarisationsfilters um 90° gedreht wurde und in Richtung -45° zeigt.

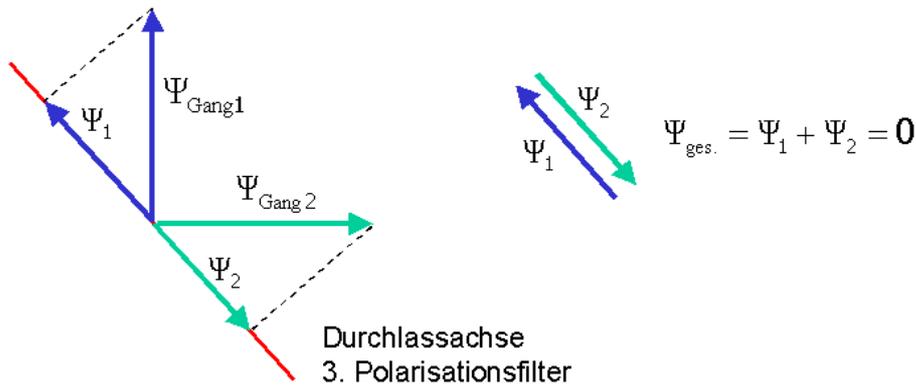


Abbildung 59: Konstruktion der Wahrscheinlichkeitsamplituden für Durchlassachse in Richtung -45° .

Aus der Projektion der Wahrscheinlichkeitsamplituden aus Gang 1 und Gang 2 auf die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters wird ersichtlich, dass die Richtungen der Vektoren antiparallel sind. Addiert man die Vektoren, so ergibt die Summe null. Das bedeutet, dass auch die Wahrscheinlichkeit, an dieser Stelle des Interferenzbildes ein Photon zu registrieren, null ist.

Ergebnis: Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, ein Photon an einer bestimmten Stelle des Interferenzbildes zu registrieren, müssen die Wahrscheinlichkeitsamplituden betrachtet werden. Durch die Addition der einzelnen Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ_1 und Ψ_2 ergibt sich eine resultierende Wahrscheinlichkeitsamplitude $\Psi_{ges.} = \Psi_1 + \Psi_2$, die das Experiment beschreibt. Allgemein wird dieses Prinzip als das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik bezeichnet: $\Psi_{ges.} = \sum_i \Psi_i$.

Das Quadrat der resultierenden Wahrscheinlichkeitsamplitude beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Photon an einer bestimmten Stelle des Schirms registriert werden kann:

$$W = (\Psi_1 + \Psi_2)^2 \text{ oder allgemein ausgedrückt: } W = \left(\sum_i \Psi_i\right)^2.$$

5.4.6 Lokalisationsproblem und Fundamentalprinzip

Anmerkung: Im Folgenden werden die oben bereits diskutierten Gedankenexperimente benutzt, um weitere Eigenschaften von Photonen herzuleiten. Das Ziel dieser Gedankenexperimente ist es, zu überprüfen, ob durch eine „Markierung“ der Photonen mit Hilfe der Polarisation der Weg eines Photons durch das Interferometer bestimmt werden kann. Diese Überlegungen führen zu dem von Alto Brachner und Richard Fichtner (Brachner 1977) formulierten Fundamentalprinzip der Quantenphysik (siehe Kapitel 3.2.4).

Überlegung: An der Stelle des Interferenzbildes, an der ein Maximum liegt, treffen Photonen aus beiden Gängen des Interferometers auf. Den Photonen stehen zwei mögliche und unterscheidbare Wege zur Verfügung, um den Schirm zu erreichen.

Frage: Kann man den Weg, den die Photonen durch das Interferometer nehmen, bestimmen?

Experiment: Die Photonen werden mit Polarisationsfiltern, deren Durchlassachsen einen Winkel von 90° bilden, in den beiden Gängen des Interferometers „markiert“. Auf diese Weise haben die Photonen leicht zu unterscheidende Marken, mit denen ihr Weg eindeutig entweder dem Gang 1 oder dem Gang 2 zugeordnet werden kann. Durch einen dritten Polarisationsfilter vor dem Schirm (siehe Abbildung 60), der entweder parallel zur Durchlassachse in Gang 1 oder parallel zur Durchlassachse in Gang 2 ist, kann überprüft werden, ob das im Moment registrierte Photon den Weg über Gang 1 oder Gang 2 genommen hat. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 60 dargestellt.

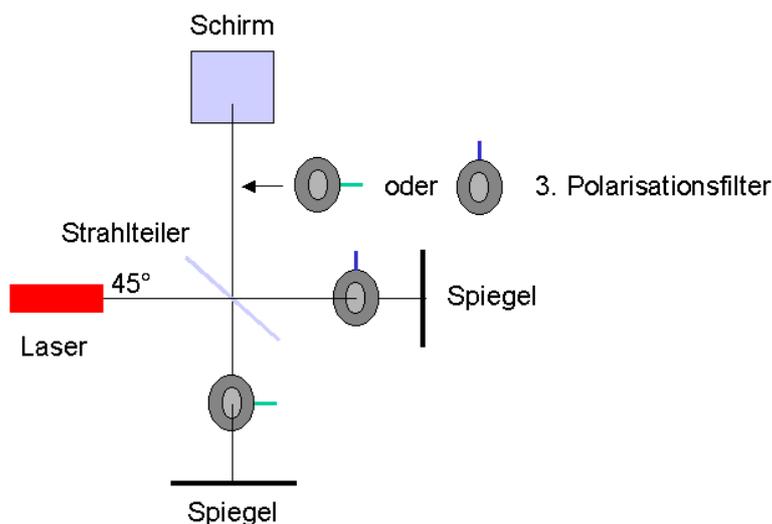


Abbildung 60: Markierung der Photonen durch Polarisationsfilter.

Beobachtung: Sind gekreuzte Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers, so verschwindet das Interferenzmuster. Wie das Experiment qualitativ zeigt, ist auf dem Schirm die Summe der Intensitäten der beiden Gänge und kein Interferenzmuster zu beobachten (siehe Abbildung 61).

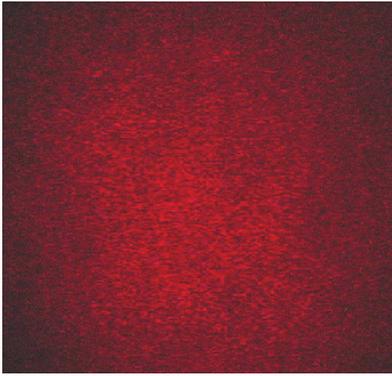


Abbildung 61: Bild auf dem Schirm bei gekreuzten Polarisationsfiltern in den Gängen.

Die Intensität auf dem Schirm setzt sich aus der Summe der Einzelintensitäten zusammen: $I_{ges} = I_1 + I_2$. Für einzelne Photonen ergibt sich analog die Wahrscheinlichkeit aus der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten: $W_{ges} = W_1 + W_2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$. Man kann jetzt zwar bestimmen, durch welchen Gang das Photon gegangen ist, aber das Interferenzmuster ist zerstört, so dass die Bestimmung des Weges eines Photons bei gleichzeitiger Beobachtung des Interferenzmusters nicht möglich ist.

Ergebnis: Gibt es gleichzeitig verschiedene Wege für ein Photon und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich ein bestimmter Weg gewählt wird, so wird die Wahrscheinlichkeit berechnet aus: $W = (\sum_i \Psi_i)^2$. In diesem Fall treten immer Interferenzterme und damit Interferenz auf. Wird hingegen durch die Versuchsanordnung festgelegt, welcher Weg gewählt wird, so berechnet sich die Wahrscheinlichkeit aus: $W = \sum_i (\Psi_i)^2$. Das Interferenzmuster ist in diesem Fall nicht mehr vorhanden. Das bedeutet, dass Lokalisation der Photonen in einem der beiden Gänge des Michelson-Interferometers und gleichzeitige Beobachtung des Interferenzmusters sich ausschließen.

Anmerkung: Diese charakteristische Verhaltensweise von Photonen erweist sich als ein allgemeines Prinzip in der Quantenphysik und wird als das quantenmechanische Fundamentalprinzip bezeichnet, das wie folgt beschrieben werden kann:

„Gibt es verschiedene Möglichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich eine bestimmte Möglichkeit gewählt wurde, so tritt immer Interferenz auf.“

Hinterlässt dagegen jedes Ereignis an der Versuchsanordnung eindeutig ein bestimmtes Merkmal, durch das entschieden werden kann, welche der verschiedenen Möglichkeiten gewählt wurde, dann tritt nie Interferenz auf.“ (Brachner 1977, S. 89).

Frage: Kann man die Photonen lokalisieren, wenn die Polarisationsfilter in den Gängen des Interferometers einen Winkel von $\neq 90^\circ$ einschließen?

Gedankenexperiment: In den Gängen des Michelson-Interferometers sind jetzt, wie in Abbildung 62 dargestellt, zwei Polarisationsfilter angeordnet, deren Durchlassachsen einen Winkel von 60° einschließen. Die Durchlassachse des einen Polarisationsfilters steht auf 0° , die des anderen steht auf 60° . Die Polarisationsrichtung des Laserlichts liegt bei 30° .

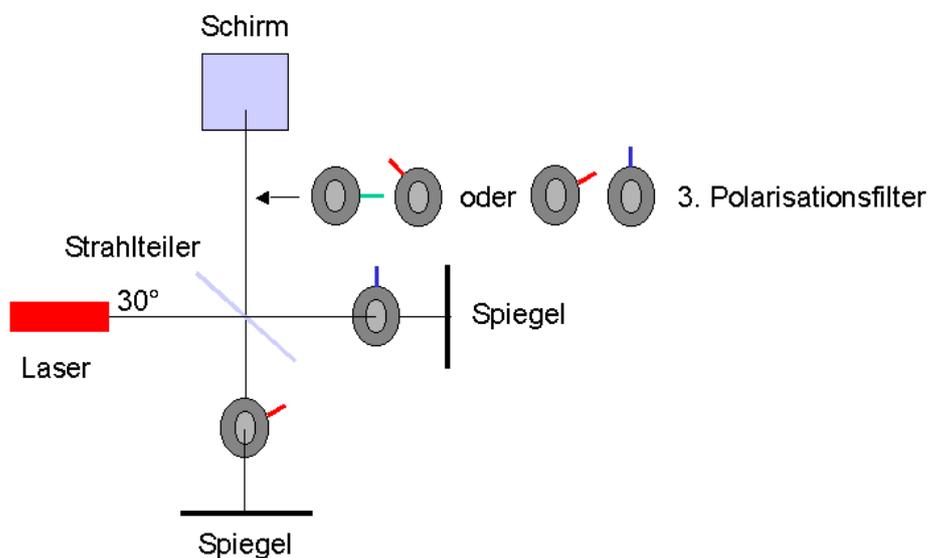


Abbildung 62: Michelson-Interferometer mit 0° und 60° Polarisationsfiltern in den Gängen.

Beobachtung: Ohne einen dritten Polarisationsfilter ist auf dem Schirm eine diffuse Beleuchtung zu beobachten, die von einem schwachen Interferenzmuster überlagert ist (siehe Abbildung 63).

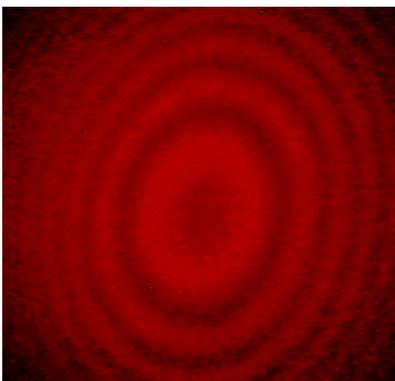


Abbildung 63: Diffuse Beleuchtung mit schwachem Interferenzmuster überlagert.

Mit einem dritten Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse gekreuzt zu der in Gang 1 ist, können die Photonen identifiziert werden, die eindeutig über Gang 2 den Schirm erreicht haben. Ist die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters gekreuzt zur Durchlassachse in Gang 2, so können alle Photonen, die den Schirm erreichen, eindeutig Gang 1 zugeordnet werden. In beiden Fällen ist eine gleichmäßige Beleuchtung, aber kein Interferenzmuster auf dem Schirm zu beobachten (siehe Abbildung 61). Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein solches Photon auf dem Schirm registriert werden kann, wird bestimmt nach: $W = \sum_i (\Psi_i)^2$.

Ist die Durchlassachse des dritten Polarisationsfilters parallel zu der Durchlassachse in Gang 1 oder Gang 2, so entsteht ein schwaches Interferenzmuster wie in Abbildung 63, das der diffusen Beleuchtung des Schirms überlagert ist. In diesem Fall kann mit dem dritten Polarisationsfilter nicht entschieden werden, welchen Weg das Photon genommen hat. Ein Photon, egal durch welchen Gang, hat eine gewisse Wahrscheinlichkeit, diesen dritten Polarisationsfilter zu durchdringen. Die Wahrscheinlichkeit für diese Photonen bestimmt sich in diesem Fall nach dem Superpositionsprinzip zu: $W = (\sum_i \Psi_i)^2$.

Ergebnis: Auch durch dieses Experiment kann der Weg der Photonen bei gleichzeitiger Beobachtung der Interferenz nicht bestimmt werden. Es gibt zwei Gruppen von Photonen: Der einen Gruppe kann ein bestimmter Weg zugeordnet werden, wobei das Interferenzmuster verschwindet. Die andere Gruppe von Photonen erzeugt zwar ein Interferenzmuster, aber ihr Weg kann nicht bestimmt werden. Je nachdem, zu welcher Gruppe die Photonen gehören, bestimmt sich deren Wahrscheinlichkeit aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Wege oder nach dem Superpositionsprinzip.

5.5 Fachdidaktische Anmerkungen zum Unterrichtskonzept

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung des in Kapitel 2 beschriebenen Lernweges durch das vorangegangene Unterrichtskonzept dargestellt. Abbildung 64 zeigt die Zuordnung ausgewählter Unterrichtsinhalte zu den Stufen des Lernweges. Im Folgenden werden die Elemente des Lernweges „Lernen in Kontexten“, „Anschaulichkeit und Abstraktion“ sowie die Elementarisierung der wichtigsten Begriffe des Unterrichtskonzeptes dargestellt. Im Anschluss werden die Zielgruppe des Unterrichtskonzeptes und die notwendigen fachlichen Voraussetzungen dargestellt.

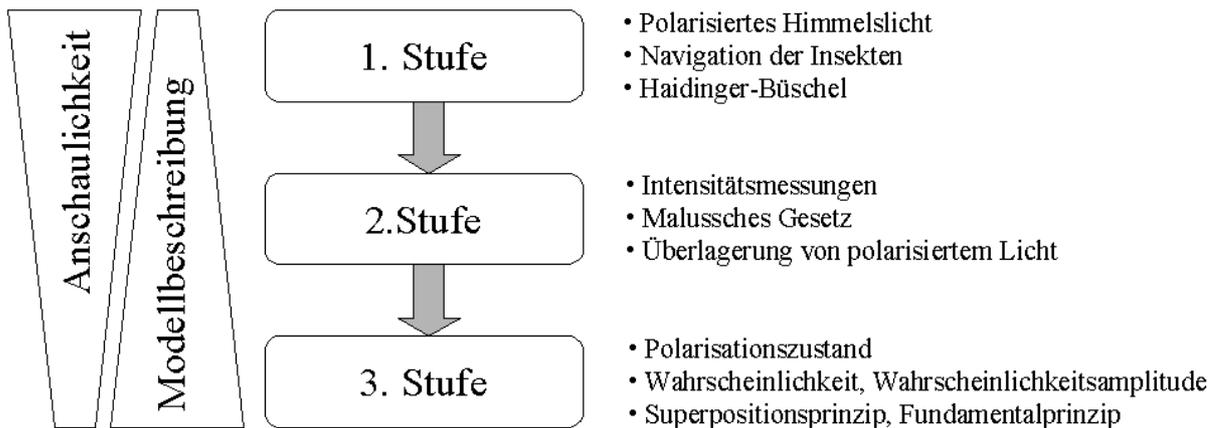


Abbildung 64: Inhalte des Unterrichtskonzeptes in Bezug auf den didaktischen Lernweg.

5.5.1 Lernen in Kontexten

Im Unterrichtsvorschlag wird das physikalische Thema der Polarisation von Licht innerhalb eines biologischen und teilweise medizinischen Rahmenkontextes erarbeitet. Der Aufbau des Komplexauges der Insekten und der Aufbau der Netzhaut des menschlichen Auges bilden die biologischen Aspekte des Unterrichts, die verbunden werden mit dem physikalischen Inhalt der Polarisation. Das Auge des Menschen ist bereits Inhalt des Physikunterrichts zum Thema „Optische Abbildung“ in der Mittelstufe. Während dort der Schwerpunkt die optische Abbildung durch die Augenlinse ist, wird hier der Aufbau und die Funktion der Netzhaut im Bereich des Gelben Flecks untersucht. Auf diese Weise wird im Unterrichtsvorschlag die Einbettung des physikalischen Inhalts in einen lebensnahen Kontext vorgenommen (siehe Kapitel 2.2.1.1).

Voraussetzung für die Umsetzung dieses fächerübergreifenden Teils des Unterrichtskonzeptes ist, dass die Kompetenz der Lehrkraft bezüglich der fachfremden Inhalte nicht überfordert wird. Aus Sicht eines Physiklehrers sind die biologischen Aspekte dieses Unterrichtsvorschlags mit der angegebenen Literatur und schulüblichen Biologiebüchern jedoch in angemessener Zeit zu erarbeiten.

5.5.2 Von der Anschaulichkeit zum Abstrakten

Phänomene bieten einen einfachen Zugang zur Physik und führen zusammen mit der menschlichen Wahrnehmung zum Verstehen und langfristigen Behalten eines physikalischen Sachverhalts. Der Ausgangspunkt dieses Unterrichtsvorschlags ist das Beobachten des Phänomens der Polarisation. Die Beobachtung wird von den Schülerinnen und Schülern an Polaris-

tionsfolien selbst durchgeführt und anschließend an weiteren Beispielen von polarisiertem Licht in der Natur vertieft. Die direkte, eigene Wahrnehmung von polarisiertem Licht durch das menschliche Auge in Form der Haidinger-Büschel ermöglicht eine Verbindung zwischen der physikalischen Eigenschaft Polarisation und dem eigenen Erleben, das zu dem gewünschten langfristigen Behalten führen kann (siehe Kapitel 2.2.1.2).

Die für die Schülerexperimente benutzten Polarisationsfolien sind kostengünstig und leicht zu erhalten¹¹. Für die Versuche wurden die Polarisationsfilter in Diarahmen eingespannt, wodurch sie handlich und unempfindlich im Umgang sind. Die Schülerinnen und Schüler können somit die Polarisationsfilter mit nach Hause nehmen und auch in ihrer Freizeit weitere Beobachtungen im Zusammenhang mit polarisiertem Licht durchführen.

Im weiteren Verlauf des Unterrichtskonzeptes wird im Gegensatz zu anderen physikdidaktischen Ansätzen (siehe Kapitel 4) der Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik nicht als „harter Bruch“ durchgeführt. Dadurch entsteht zwischen der klassischen Beschreibung und der quantenphysikalischen Beschreibung der Experimente eine Verbindung dieser beiden Bereiche im Sinne einer Vernetzung der Inhalte (siehe Kapitel 2.1.2). Die Schülerinnen und Schüler sollen durch einen allmählichen Übergang zur quantenphysikalischen Denkweise die Einsicht gewinnen, dass die quantenphysikalischen Phänomene trotz ihrer Abstraktheit prinzipiell verstehbar sind. In den klassischen Polarisationsexperimenten wird mit Hilfe des Malusschen Gesetzes die durch eine Anordnung von Polarisationsfiltern hindurchgehende Intensität berechnet. Bei der Deutung dieser Experimente in der Photonenvorstellung wird die Intensität in Abhängigkeit der Photonenzahl ausgedrückt, und mit Hilfe des Malusschen Gesetzes lässt sich die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der Photonen eine Anordnung von Polarisationsfiltern durchdringen. In Experimenten, in denen polarisiertes Licht überlagert wird, zeigt sich, dass das Verhalten des Lichts nicht mit Hilfe der Intensität beschrieben werden kann. Erst durch die Betrachtung des elektrischen Feldvektors können die Experimente erklärt werden.

Der Ausgangspunkt jeglicher Beschreibung ist also das real durchgeführte Schüler- bzw. Demonstrationsexperiment. Das polarisierte Licht wird auf der Modellebene mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben. In der daran anschließenden Deutung der Experimente in der Photonenvorstellung wird das Modell des elektrischen Feldvektors erweitert durch den Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude. Die grundlegende Bedeutung des Modells bleibt

¹¹ Zum Beispiel bei <http://www.astromedia.de>.

dabei erhalten und es erweist sich als tragfähig, da neue Eigenschaften und Begriffe zur Beschreibung des quantenphysikalischen Verhaltens auf den vorhandenen Inhalten aufgebaut werden können (siehe Kapitel 2.1.2). Der Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude, der im Weiteren zum Superpositionsprinzip und zum Fundamentalprinzip führt, sowie der quadratische Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeitsamplitude und Wahrscheinlichkeit werden mit Hilfe der Analogie zum elektrische Feldvektor und der Intensität entwickelt. Durch diese Analogiebetrachtung und die Tragfähigkeit der Modellbeschreibung entsteht eine Anschaulichkeit der abstrakten Inhalte der Quantenphysik, wie sie in Kapitel 2.1.1 für den Lernweg gefordert wurde.

5.5.3 Elemente des Unterrichtskonzeptes

Im Folgenden werden die zentralen Begriffe des Unterrichtskonzeptes im Hinblick auf ihre Elementarisierung betrachtet (siehe Kapitel 2.2.3.1). Zu diesen zentralen Begriffen gehören der Polarisationszustand, die Wahrscheinlichkeit, die Wahrscheinlichkeitsamplitude sowie das Superpositionsprinzip und das Fundamentalprinzip. Diese Begriffe werden in der vorliegenden Arbeit im Sinne der Identifizierung der grundlegenden Idee als elementar für das Verhalten quantenphysikalischer Objekte angesehen. Nachfolgend wird für die einzelnen Begriffe der Aspekt der Vereinfachung als Teil der Elementarisierung dargestellt.

5.5.3.1 Der Zustandsbegriff

Mit der Einführung des Photons zur Beschreibung von Licht ist eine Schwierigkeit verbunden, die alle physikalischen Größen betrifft, mit denen die klassischen Experimente beschrieben wurden: Was bedeuten die einst klassischen Begriffe, die die elektromagnetische Welle beschrieben haben, in Bezug auf ein Photon? Im Unterrichtskonzept wird diese Schwierigkeit überwunden, in dem der Begriff des quantenphysikalischen Zustands in Form des Polarisationszustands von Photonen eingeführt wird. Dabei wird in der Deutung der Gedankenexperimente das nichtklassische Verhalten der Photonen deutlich, dass der Polarisationszustand durch die Messanordnung beeinflusst wird. Im Unterrichtskonzept wird hierzu die quantenphysikalische Vorgehensweise verwendet, in der aus dem Verhalten von vielen Photonen auf das Verhalten eines einzelnen Photons geschlossen wird, ohne eine konkrete Vorstellung von einem einzelnen polarisierten Photon zu haben. Durch diese Beschreibung lernen die Schülerinnen und Schüler eine neue naturwissenschaftliche Methode kennen, die

sich dadurch auszeichnet, dass in einem Abstraktionsprozess von vielen quantenphysikalischen Objekten auf ein einzelnes Objekt geschlossen wird.

Der Übergang von zunächst real durchgeführten Polarisationsexperimenten zu Gedankenexperimenten sowie der Schluss von vielen Photonen auf ein einzelnes Photon soll die Einführung des Zustandsbegriffs verständlich machen. Dabei wird besonders durch die Polarisations-eigenschaft deutlich, dass jede Messung des Polarisationszustandes durch einen Polarisationsfilter eine Auswirkung auf den Zustand der Photonen zur Folge haben kann. Die Einführung des Zustandsbegriffs durch dieses Vorgehen vereinfacht den ansonsten abstrakten quantenphysikalischen Zustandsbegriff.

5.5.3.2 Die Wahrscheinlichkeit

Im Unterrichtskonzept wird der für die Quantenphysik fundamentale Begriff der Wahrscheinlichkeit mit Hilfe des Malusschen Gesetzes eingeführt. Das Malussche Gesetz wurde dazu mit Hilfe von quantitativen Intensitätsmessungen in den klassischen Polarisationsexperimenten hergeleitet. Die Deutung der Polarisationsexperimente in der Photonenvorstellung sowie die Darstellung der Intensität in Abhängigkeit von der Photonenzahl führt mit Hilfe des Malusschen Gesetzes zu einer statistischen Deutung der Photonenexperimente. Innerhalb dieser statistischen Deutung wird der Begriff der Wahrscheinlichkeit eingeführt, mit dem eine Aussage über das Verhalten einzelner Photonen ermöglicht wird. Das Malussche Gesetz stellt somit eine Gesetzmäßigkeit dar, mit der sowohl in den klassischen Polarisationsexperimenten die Intensität berechnet werden kann als auch in den quantenphysikalischen Polarisationsexperimenten die Antreffwahrscheinlichkeit von Photonen.

Die Elementarisierung besteht in der Herleitung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs aus dem Malusschen Gesetz, mit dem sowohl die Intensität in den klassischen Polarisationsexperimenten als auch die Wahrscheinlichkeit in den Gedankenexperimenten berechnet werden kann.

5.5.3.3 Wahrscheinlichkeitsamplitude und Superpositionsprinzip

Bei den klassischen Experimenten zur Überlagerung von polarisiertem Licht wurde festgestellt, dass zur Beschreibung des Interferenzmusters der elektrische Feldvektor betrachtet werden muss. Ein ähnliches Vorgehen ergibt sich bei der Beschreibung der Interferenzexperimente mit einzelnen Photonen, bei denen die Notwendigkeit eines Analogons zum elektrischen Feldvektor deutlich wird. Für die Beschreibung dieser Interferenzexperimente wird

die in der Quantenphysik fundamentale, aber vollkommen abstrakte Wahrscheinlichkeitsamplitude Ψ eingeführt, die keinerlei anschauliche Bedeutung hat. Da in den klassischen Polarisationsexperimenten ein quadratischer Zusammenhang zwischen der gemessenen Intensität und dem elektrischen Feldvektor ermittelt wurde, wird in einem Analogieschluss dieselbe quadratische Abhängigkeit zwischen der Wahrscheinlichkeit W und der Wahrscheinlichkeitsamplitude Ψ angenommen. Erst das Betragsquadrat der Wahrscheinlichkeitsamplitude hat als Antreffwahrscheinlichkeit eine konkrete, physikalisch messbare Bedeutung.

Durch die Addition der Wahrscheinlichkeitsamplituden für einzelne Photonen können die Interferenzexperimente in der Deutung der Photonenvorstellung beschrieben werden. Dieses Vorgehen wird als das Superpositionsprinzip der Wahrscheinlichkeitsamplituden bezeichnet, das ein grundlegendes Prinzip in der Quantenphysik darstellt. Dieses Prinzip verdeutlicht, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Photon auf dem Schirm zu detektieren, sich im Allgemeinen nicht aus der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten zusammensetzt. Somit gelangt man zu dem Ergebnis, dass die Gleichung $W_{ges.} = W_1 + W_2$ klassisch richtig wäre, aber quantenmechanisch im Allgemeinen nicht. Dabei ist die Konstruktion der Wahrscheinlichkeitsamplituden durch die Komponentenerlegung identisch mit der der elektrischen Feldvektoren bei der Überlagerung von polarisiertem Licht.

Die Elementarisierung der Wahrscheinlichkeitsamplitude erfolgt durch die Analogie zum elektrischen Feldvektor. Dieses Vorgehen soll den Schülerinnen und Schülern den Zugang zu dem abstrakten Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude erleichtern. Zudem kann durch die Wahl der Polarisation als Eigenschaft des Lichts die generell vieldimensionale Wahrscheinlichkeitsamplitude als zweidimensionaler Vektor behandelt werden. Mit diesem können analog zu den klassischen Experimenten die grafischen Konstruktionen für das Superpositionsprinzip durchgeführt werden. Die Reduzierung der Wahrscheinlichkeitsamplitude auf einen zweidimensionalen Vektor ist dabei fachlich zulässig und erweiterbar.

5.5.3.4 Fundamentalprinzip

Das Fundamentalprinzip kann als Grundlage für eine Erklärung von quantenphysikalischen Phänomenen betrachtet werden, die klassisch völlig unverständlich sind. Der Kernpunkt dieses Ansatzes bildet das Interferometer-Experiment mit Photonen, das als ungestörtes Experiment ein Interferenzmuster auf dem Schirm zeigt. Werden die Wege der Photonen durch einen bestimmten Messprozess mit Polarisationsfiltern unterschieden, so verschwindet das Interferenzmuster. Diese prinzipielle Verschiedenheit der beiden Experimente, zum einen

das ungestörte Experiment und zum anderen das mit einer zusätzlichen Messapparatur gestörte Experiment, führt zu diesem grundlegenden Prinzip in der Quantenphysik, das als quantenmechanisches Fundamentalprinzip bezeichnet wird. Dieses Prinzip beschreibt ein qualitativ völlig anderes Verhalten der Photonen, als das Verhalten von Objekten, die durch die klassische Physik beschrieben werden. Im Interferometer-Experiment mit Photonen können die beiden Wege, die das Photon durch das Interferometer nimmt, zwar gedanklich getrennt werden, real ist dies allerdings nicht möglich. Obwohl die Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ_1 und Ψ_2 die einzelnen, gedanklich unterschiedenen Wege beschreiben, stellt man bei der Lokalisation im Falle ununterscheidbarer Möglichkeiten fest, dass es keinen Zustand der Photonen gibt, der mit „Photon in Gang 1“ oder „Photon in Gang 2“ charakterisiert werden kann. Allerdings kann die jeweilige Wahrscheinlichkeitsamplitude aus den Wahrscheinlichkeitsamplituden zusammengesetzt werden, die zu den jeweiligen Wegen gehören (Superpositionsprinzip). Die Unterscheidung der zwei unterschiedlichen Wege wird durch die Summation wieder rückgängig gemacht. Die resultierende Wahrscheinlichkeitsamplitude drückt dann sowohl Weg 1 als auch Weg 2 aus, und es tritt Interferenz auf.

Das Fundamentalprinzip beschreibt, dass es zwei wesentlich verschiedene Experimente in der Quantenphysik sind, ob tatsächlich entschieden ist, dass der eine oder andere Weg gewählt wurde, oder ob es sich nur um eine gedankliche Unterscheidung handelt. Dieses Prinzip wurde im Unterrichtskonzept durch real durchführbare Experimente elementarisiert und auf einer qualitativen Ebene plausibel gemacht, die den Schülerinnen und Schülern ein Verständnis des Prinzips ohne besondere mathematische Kenntnisse ermöglicht.

5.5.4 Zielgruppe und Anforderungen

Der Unterrichtsvorschlag setzt seinen Schwerpunkt auf physikalische Inhalte und ist für den Physikunterricht in einem Grund- oder Leistungskurs der gymnasialen Oberstufe gedacht. Der Unterrichtsvorschlag ist besonders für einen Physikgrundkurs geeignet, da die Motivation der Schülerinnen und Schüler, sich mit physikalischen Inhalten auseinander zu setzen, durch den kontextorientierten Zugang zur Polarisation von Licht gesteigert werden kann. Der Unterrichtsvorschlag bietet einer Lehrkraft die Möglichkeit, je nach Leistungsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler und Ziel des Unterrichts die Inhalte einzusetzen. Dabei kann das Thema der Polarisation anfänglich anhand eines fächerübergreifenden Kontextes erarbeitet werden, innerhalb dessen die Polarisation auf Grundlage der Wellenvorstellung von Licht mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben wird. Darauf aufbauend kann der Unterrichts-

gang weiter verfolgt werden, um in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien einzuführen. Eine fachliche Vertiefung der Inhalte für einen Physikleistungskurs ist an vielen Stellen möglich.

Üblicherweise wird in der gymnasialen Oberstufe vor dem Thema „Optik“ das Gebiet der „Schwingungen und Wellen“ unterrichtet, in dem die Voraussetzungen für die Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle geschaffen werden. Ist das Wellenmodell den Schülerinnen und Schülern bekannt, kann der elektrische Feldvektor als seitliche Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung für die Beschreibung der Polarisation genutzt werden. Im Unterrichtsvorschlag werden zur Beschreibung des polarisierten Lichts bzw. des Verhaltens der Photonen im Wesentlichen die Vektorprojektion und -addition sowie die Kosinusfunktion benutzt, so dass auf einen anspruchsvollen mathematischen Formalismus, wie ihn andere physikdidaktische Ansätze bei der Einführung in die Quantenphysik benutzen (siehe Kapitel 4), weitgehend verzichtet werden kann. Dabei werden ausgehend von qualitativen Beobachtungen in Intensitätsmessungen und deren Beschreibung durch graphische Konstruktionen einfache Zusammenhänge ermittelt. Die Einführung in Begriffe und Prinzipien der Quantenphysik erfolgt auf einer qualitativen Ebene, bei der auf den quantenphysikalischen Formalismus und dessen Schreibweise verzichtet werden kann. Zudem kann der Unterrichtsvorschlag auf die Einführung komplexer Zahlen verzichten, da das quantenphysikalische Verhalten der polarisierten Photonen mit Hilfe des Vektorcharakters der Wahrscheinlichkeitsamplitude beschrieben werden kann. Diese Vorgehensweise übersteigt weder die fachlichen Kompetenzen der Lehrkräfte noch die mathematischen Kenntnisse der Schülerinnen und Schüler. Dadurch eignet sich der Unterrichtsvorschlag besonders für Schülerinnen und Schüler eines Physikgrundkurses, um ihnen einen Einblick in das quantenphysikalische Verhalten von Mikroobjekten zu geben.

6 Unterrichtserfahrungen und Evaluation

In diesem Kapitel wird über Unterrichtserfahrungen berichtet, die von mir mit Teilen der in Kapitel 5 vorgestellten Unterrichtsinhalte gemacht wurden. Der Unterricht wurde in einem Physikleistungskurs (siehe Kapitel 6.1) und in einem Physikgrundkurs (siehe Kapitel 6.2) der 13. Jahrgangsstufe durchgeführt. Vor der Unterrichtseinheit wurde den Schülerinnen und Schülern ein Vorfragebogen zur Beantwortung gegeben, in dem nach bereits vorhandenem Wissen und den Vorstellungen zu den jeweiligen Unterrichtsinhalten gefragt wurde. Für die vorliegende Arbeit sind neben den Schülervorstellungen zur Quantenphysik zwei weitere Bereiche interessant. Zum einen sind das die Vorstellungen, die Schülerinnen und Schüler vom Licht haben und die damit verbundene Einstellung gegenüber physikalischen Modellen, mit denen das Verhalten von Licht beschrieben werden kann. Zum anderen sind die Vorstellungen zu erkenntnistheoretischen Fragestellungen aufschlussreich, da der Lernprozess und damit auch der Lernerfolg in einem abstrakten Themengebiet, wie es die Quantenphysik ist, von der Einstellung zur Erkenntnisgewinnung in der Wissenschaft abhängen kann. Nach der Unterrichtseinheit wurde ein Nachfragebogen gestellt, der eine Einschätzung über angeeignetes Wissen und eine eventuelle Veränderung der Vorstellungen geben sollte. Die Fragen bestanden aus offenen sowie gebundenen Antwortformaten (siehe Anhang B). Mit einem Teil der Fragen wurde das Wissen in Form eines Leistungstests überprüft. Einige Fragen zu quantenphysikalischem Verhalten sind einer Untersuchung von Michael Lichtfeldt (Lichtfeldt 1991) entnommen, um die Schülerantworten meiner Untersuchung mit den Ergebnissen der Lichtfeldt-Studie vergleichen zu können. Zwei wissenschaftstheoretische Fragestellungen lehnen sich an Formulierungen an, die Horst Schecker und Ulf Krüger (Krüger 1982) in einer Untersuchung zu den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Erkenntnisprozess in der Physik entwickelt haben. Die vollständigen Fragebögen sind im Anhang B dargestellt.

Die von mir durchgeführte Untersuchung der Schülervorstellungen sowie deren Änderung nach dem Unterricht kann aufgrund der relativ geringen Schülerzahlen lediglich eine Einschätzung über die Umsetzbarkeit der Unterrichtsinhalte und eine eventuelle Veränderung der Schülervorstellung geben.

Die folgenden Kapitel 6.1 und 6.2 sind so aufgebaut, dass zunächst der Vorfragebogen und dessen Ergebnisse beschrieben werden, dann werden die Unterrichtsinhalte dargestellt, und

daran anschließend wird über den Nachfragebogen und dessen Ergebnisse berichtet. In der Auswertung der Fragebögen wird lediglich auf solche Antworten näher eingegangen, die für die Entwicklung der Unterrichtsinhalte von Bedeutung waren.

6.1 Unterrichtsversuch I

Der erste Unterrichtsversuch fand in einem Physikleistungskurs der 13. Jahrgangsstufe in einem Gymnasium in Bad Wildungen statt. Am Unterricht haben sechs Schülerinnen und 14 Schüler teilgenommen. In diesem Kurs wurde von mir im November 1999 eine Doppelstunde zu klassischen Polarisationsversuchen durchgeführt. Im Vorfeld wurde ein Fragebogen zum Thema „Polarisation von Licht“ von den Schülerinnen und Schülern beantwortet. Im Februar 2000 fanden im gleichen Kurs ebenfalls von mir geleitet vier Unterrichtsstunden zur Einführung in Begriffe der Quantenphysik mit Hilfe von Polarisationsexperimenten statt. Vor und nach dieser Unterrichtseinheit wurde von den Schülerinnen und Schülern ebenfalls ein Fragebogen bearbeitet.

6.1.1 Vorfragebogen zur Polarisation von Licht

Der Vorfragebogen (siehe Anhang B.1) sollte überprüfen, ob den Schülern der Begriff „Polarisation“ bereits bekannt ist. Weiterhin wurde danach gefragt, ob bekannt ist, dass Insekten polarisiertes Licht wahrnehmen können und ob der Mensch dieses ebenfalls kann. Dazu wurde den Schülern eine Polarisationsfolie gegeben, die in einen Diarahmen eingespannt war. Sie sollten den Versuch zu den Haidinger-Büscheln durchführen, der im Unterrichtsvorschlag in Kapitel 5.2.2 dargestellt ist, und beschreiben, was sie gesehen haben. Diese Fragen waren für die Entwicklung des in Kapitel 5 vorgestellten Unterrichtskonzeptes von Bedeutung.

In zwei weiteren Fragen wurde zunächst eine Aufgabe zur Polarisation von Mikrowellen durch einen Drahtgitterpolarisator gestellt, der den Schülerinnen und Schülern bereits bekannt war. Anschließend wurde überprüft, ob die Schülerinnen und Schüler die Wirkung des Drahtgitterpolarisators auf eine Polarisationsfolie und dessen Wirkung auf Licht übertragen.

6.1.2 Ergebnisse aus dem Vfragebogen zur Polarisation von Licht

Der Vfragebogen wurde von insgesamt 20 Schülerinnen und Schülern beantwortet, von denen die Hälfte den Begriff „Polarisation“ außer im Zusammenhang mit Mikrowellen nicht kannte. Die andere Hälfte der Schülerinnen und Schüler kannte den Begriff „Polarisation“ aus dem Chemieunterricht, wo er in Zusammenhang mit optisch aktiven Substanzen behandelt wurde. Diese Antworten führten zu der Ausarbeitung eines Funktionsmodells für optische Aktivität, das aus einer Anordnung von Polarisationsfiltern hergestellt wird (Rieck 1999). 15 Schülerinnen und Schüler waren der Meinung, dass man polarisiertes Licht mit Hilfe eines Gitters herstellt. Diese Vermutung scheint nicht verwunderlich zu sein, denn polarisierte Mikrowellen werden ebenfalls mit einem Drahtgitterpolarisator hergestellt. Genau wie bei dem Drahtgitterpolarisator muss bei einer Polarisationsfolie darauf geachtet werden, dass die Wirkungsweise der Polarisationsfolie deutlich wird und es nicht zu irreführenden Vorstellungen kommt, wie sie bereits in Kapitel 3.1.4 diskutiert wurden.

Bei dem Versuch zu den Haidinger-Büscheln haben 12 der Schülerinnen und Schüler beim Blick durch die Polarisationsfolie eine Figur erkannt, die sich „irgendwie“ beim Drehen der Folie mitbewegt. Ohne eine detaillierte Anleitung haben die meisten Schüler die gelbe Farbe dieser Figur und die charakteristische Form erkannt. Aus diesen Antworten wurde geschlossen, dass der Versuch zu den Haidinger-Büscheln, so wie er in Kapitel 5.2.2 dargestellt ist, ein durchführbarer Unterrichtsversuch ist.

Von allen Schülerinnen und Schülern wurde die Aufgabe zur Polarisation von Mikrowellen richtig bearbeitet. Sie konnten sich daran erinnern, dass der Drahtgitterpolarisator nicht in Ausrichtung seiner Stäbe polarisiert, sondern senkrecht dazu. Allerdings wurde eine Analogie zwischen der Wirkungsweise des Drahtgitterpolarisators und der Polarisationsfolie von den meisten Schülerinnen und Schülern nicht erkannt.

6.1.3 Inhalte des Unterrichts zum Thema Polarisation von Licht

Ziel der Doppelstunde war es, die Polarisation von Licht einzuführen und mit Hilfe des elektrischen Feldvektors zu beschreiben. Den Schülerinnen und Schülern war die Polarisation von Mikrowellen durch einen Drahtgitterpolarisator bereits bekannt. Als Polarisator für Licht wurde die Polarisationsfolie eingeführt, mit der in Demonstrationsexperimenten die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors erarbeitet wurde (siehe Kapitel 5.1). Ergebnis

dieser Versuche war, dass die Lage des elektrischen Feldvektors die Polarisationsrichtung bestimmt und seine Länge ein Maß für die Intensität ist, die auf dem Schirm beobachtet werden konnte. In weiteren Experimenten wurde die Polarisation von Licht durch Reflexion unter dem Brewster-Winkel untersucht. Zur Erklärung wurde das Hertzsche Dipolmodell herangezogen, das aus dem Unterricht zu „Schwingungen und Wellen“ bereits bekannt war. Durch die Konstruktion des reflektierten Anteils des Lichtes wurde die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors wiederholt.

Im Unterricht bereitete die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors den Schülerinnen und Schülern keine Schwierigkeiten. Vektoren und die benutzten trigonometrischen Funktionen waren ihnen bekannt, so dass sie sicher damit umgehen konnten. Größere Schwierigkeiten bereitete das Hertzsche Dipolmodell, an das sich trotz einer kurzen Wiederholung einige Schüler nicht erinnern konnten. Die Konstruktion des reflektierten Anteils des elektrischen Feldvektors machte den meisten Schülern keine Schwierigkeiten. Damit wurde das Ziel dieser Doppelstunde, die Einführung der Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors und die Beschreibung des polarisierten Lichts durch diesen, im Wesentlichen erreicht.

Eine Überprüfung dieses Zieles fand in dem Nachfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe statt (siehe Kapitel 6.1.7).

6.1.4 Vorfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe

Das Ziel dieses Vorfragebogens (siehe Anhang B.2) war es, die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler über physikalische Eigenschaften von makroskopischen und mikroskopischen Objekten zu erfassen. Die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zu diesem Thema sind für das in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtskonzept von Bedeutung, in dem ausgehend von einer klassischen Beschreibung des Lichts in quantenphysikalische Begriffe eingeführt wird. Zu Frage 3 „Was sind besondere Teilchen/Objekte in der Physik?“ wurden Antworten wie beispielsweise Elektron, Proton, Atom oder Neutron erwartet. Überprüft werden sollte, ob die Schülerinnen und Schüler diesen Teilchen eine andere Kategorie, im Vergleich zu den klassischen Teilchen, zuordnen. Weiterhin wurde nach Eigenschaften von Quantenobjekten gefragt. Dabei sollte überprüft werden, ob die Schüler andere Begriffe für wichtig erachten, wenn es um die Beschreibung von Quantenobjekten geht. Die Frage „Was ist Licht?“ sollte die Schüler provozieren, eine Definition zu geben, was das Licht ihrer Meinung nach „wirklich“ ist. Die Antwort auf diese Frage könnte einen Hinweis darauf

geben, in wie weit die Schüler ein Modell von der Realität unterscheiden. Vielleicht sind sie fähig, die Unmöglichkeit einer konkreten Antwort zu erkennen. Dieses kann im Sinne einer Offenheit für weitere Erklärungsmodelle interpretiert werden, was in Hinsicht auf die Beschreibung quantenphysikalischer Prozesse wünschenswert ist.

Durch zwei wissenschaftstheoretische Fragen wurde versucht, die bei den Schülerinnen und Schülern vorherrschende Vorstellung über den Erkenntnisprozess in der Physik zu ermitteln. Zum einen stellen die Antworten den bevorzugten Erkenntnisweg dar und zum anderen sollen Wahrheitskriterien erfasst werden, die die Schülerinnen und Schüler bezüglich physikalischer Theorien bevorzugen.

6.1.5 Ergebnisse des Vfragebogens

Aus den Antworten zu den Eigenschaften klassischer Objekte geht hervor, dass die Schülerinnen und Schüler ruhenden bzw. bewegten Körpern unterschiedliche Begriffe zuordnen. Während bei ruhenden Körpern Begriffe wie Masse, Kraft und Gewicht als wichtig erachtet werden, sind es bei bewegten Körpern „Aktivitätsmerkmale“ wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und kinetische Energie. Diese Einordnung der Begriffe ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Untersuchung von Lichtfeldt (Lichtfeldt 1991), die vermuten lassen, dass sich die Schüler bei der Einordnung der Begriffe eher auf die Unterschiede zwischen ruhenden und bewegten Körpern beziehen. Nach Lichtfeldts Ansicht geben die Antworten einen Hinweis darauf, dass den Schülern nicht bewusst ist, dass die Mechanik die Aufgabe hat, die Bahnen von Objekten zu berechnen, also die Angabe des Ortes in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen. Diese Einschätzungen sind auch vergleichbar mit den Ergebnissen einer Untersuchung von Göritz und Wiesner (Göritz 1984).

Auf die Frage, was für die Schülerinnen und Schüler besondere Teilchen sind, werden Elektron, Proton, Atom, Neutrinos und Photon genannt, aber es werden auch makroskopische Dinge angegeben, die die Schüler aus ihrem Unterricht kennen, wie zum Beispiel Messgeräte. Es ist zu bezweifeln, dass die Schüler eine konkrete Vorstellung von den genannten Elementarteilchen haben. Ob die Schüler mit diesen mikroskopischen Objekten makroskopische Eigenschaften verbinden, kann durch diese Frage nicht entschieden werden. Alle Schülerinnen und Schüler haben auf die Beantwortung der Frage nach der Natur des Lichts die Begriffe Teilchen und Welle benannt. Bei ca. der Hälfte der Schüler entstand bei der Auswertung der Fragen der Eindruck, dass sie der Meinung sind, das Licht bestehe aus Photonen bzw. Wellen, also das Erklärungsmodell zur Realität wurde. Ein Drittel der Schüler

gab an, die Natur des Lichts mit Hilfe des Experiments festzulegen. Diese Schüler scheinen es nicht als ein Problem anzusehen, dass das Verhalten von Licht mit zwei unterschiedlichen Modellen beschrieben werden kann. Die beiden Erklärungsmuster existieren nebeneinander. Ähnliche Ergebnisse leitete Lichtfeldt (Lichtfeldt 1991) aus der Beantwortung dieser Frage in seiner Untersuchung ab.

Aus den Antworten auf die wissenschaftstheoretischen Fragen geht hervor, dass bei den Schülerinnen und Schülern überwiegend die Vorstellung vorhanden ist, dass Erkenntnisse in der Physik in erster Linie aus langen Versuchsreihen ermittelt werden. Diese Ansicht spiegelt die wahrscheinlich im Physikunterricht übliche Praxis wieder, dass mehrere Versuche dazu benutzt werden, ein Gesetz herzuleiten. Die Durchführung eines einzelnen Experiments wird dabei nicht als gleichwertiger Erkenntnisgewinnungsweg akzeptiert. Im Vergleich dazu wird der Durchführung eines Gedankenexperiments zur Gewinnung von physikalischen Erkenntnissen mehr zugetraut, als der Durchführung eines einzelnen Experiments. Diese Aussage ist für das in Kapitel 5 dargestellte Unterrichtskonzept von Bedeutung, da dort mit Hilfe von Gedankenexperimenten quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien entwickelt werden.

6.1.6 Inhalte des Unterrichts zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe

Am Anfang des Unterrichts zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe wurde die Komponentenerlegung des elektrischen Feldvektors wiederholt. Anschließend wurde der Zusammenhang zwischen der durch die Polarisationsfilter hindurchgehenden Intensität in Abhängigkeit von der Stellung der Durchlassachse durch Messungen ermittelt. Diese Untersuchungen führten zum Malusschen Gesetz, das im weiteren Verlauf des Unterrichts in der Photonenvorstellung des Lichts verwendet wurde. Zwischen der Intensität und der Länge des elektrischen Feldvektors wurde ein quadratischer Zusammenhang ermittelt. Im weiteren Verlauf des Unterrichts wurden die bereits durchgeführten Polarisationsexperimente in der Photonenvorstellung gedeutet. Dazu wurde der Zustandsbegriff und dessen Zusammenhang mit der Messung diskutiert. Abschließend konnte mit Hilfe des Malusschen Gesetzes in der Photonenvorstellung der Wahrscheinlichkeitsbegriff eingeführt werden, mit dem das Eintreten eines Ereignisses bestimmt werden kann. Als Analogon zum elektrischen Feldvektor wurde die Wahrscheinlichkeitsamplitude benannt.

Die Unterrichtseinheit entspricht in wesentlichen Teilen den in Kapitel 5.3 und 5.4 dargestellten Inhalten.

6.1.7 Nachfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe

Der Fragebogen (siehe Anhang B.3), den die Schülerinnen und Schüler zwei Wochen nach dem Unterricht zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe bearbeitet haben, sollte Einschätzungen von den Vorstellungen der Schüler und deren eventuelle Veränderung durch den Unterricht ermöglichen. Einige Fragen überprüften in Form eines Leistungstests die im Unterricht vermittelten Inhalte, wie zum Beispiel die Konstruktion des elektrischen Feldvektors, die Proportionalität zwischen der Intensität und dem elektrischen Feldvektor sowie das Malus'sche Gesetz. Weitere Fragen bezogen sich auf die Eigenschaften und das Verhalten von Photonen in den im Unterricht durchgeführten Gedankenexperimenten. Dabei lag der Schwerpunkt auf dem Zustandsbegriff und der Erzeugung eines Zustandes durch eine Messung sowie der Bedeutung der Wahrscheinlichkeitsaussagen und der Analogie zwischen Wahrscheinlichkeit und Intensität. Mit diesen Fragen sollte herausgefunden werden, welche Vorstellungen die Schüler von den Eigenschaften eines Photons haben und ob sie das Photon als ein klassisches Objekt mit vorhersagbaren Eigenschaften ansehen oder mit Wahrscheinlichkeiten verbinden. Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Schüler statistische Aussagen als ungenau einstufen oder ob sie den prinzipiellen Unterschied zu deterministischen Aussagen erkennen.

Die beiden letzten Fragen bezogen sich auf wissenschaftstheoretische Inhalte und sind identisch mit den Fragen aus dem Vorfragebogen. Dadurch könnte eine eventuelle Veränderung der Vorstellungen in Bezug auf die physikalische Erkenntnisgewinnung nach dem Unterricht festgestellt werden.

6.1.8 Ergebnisse des Nachfragebogens

Die Ergebnisse des Nachfragebogens lassen nur in einem beschränkten Maß eine Aussage darüber zu, in wie weit die Schülerinnen und Schüler sich ein quantenphysikalisches Denken zu eigen gemacht haben. Allerdings liefern die Ergebnisse eine Einschätzung darüber, ob die Inhalte im Unterricht eine Grundlage für eine solche Denkweise bilden können.

Insgesamt haben 18 Schülerinnen und Schüler den Nachfragebogen beantwortet. Die ersten drei Fragen, die in Form von Testaufgaben die Reproduktion von Unterrichtsinhalten erforderte, wurden von insgesamt 16 Schülerinnen und Schülern richtig beantwortet. Zur Erklärung von Einzelphotonenexperimenten argumentieren 15 Schüler in der offen gestellten Frage mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses. In weiteren

Fragen bestätigen sie, dass die Wahrscheinlichkeit berechnet werden kann und stimmten zu, dass die Wahrscheinlichkeit einzelner Photonen analog zur Intensität des Lichts berechnet werden kann. Offensichtlich werden die statistischen Aussagen der Experimente von den Schülerinnen und Schülern akzeptiert. Zehn der Schülerinnen und Schüler stimmten zu, dass der Polarisationsfilter einen Polarisationszustand erzeugt. 16 Schüler bestätigten, dass sich Photonen im gleichen Polarisationszustand nicht immer gleich verhalten. Dies lässt den Schluss zu, dass die Erzeugung eines Polarisationszustandes durch ein „Messgerät“, wie der Polarisationsfilter eines darstellt, akzeptiert wird. Die Einteilung der Photonen in eine Gesamtheit und deren Überprüfung durch einen gleichartigen Polarisationsfilter wird von 17 Schülerinnen und Schülern anerkannt. Der Rückschluss von vielen Photonen auf das einzelne Photon scheint ebenfalls akzeptiert zu werden.

Aus den Antworten zu den wissenschaftstheoretischen Fragestellungen geht hervor, dass nach Meinung der Schülerinnen und Schüler ein Erkenntnisgewinn durch lange Versuchsreihen von Bedeutung ist. Die Bestätigung der Allgemeingültigkeit einer physikalischen Aussage wird weiterhin in der Durchführung von mehreren Experimenten gesehen. Die Durchführung von Gedankenexperimenten als Weg der Erkenntnisgewinnung spielt eine untergeordnete Rolle, obwohl im Unterricht des Verhaltens von Photonen mit Hilfe von Gedankenexperimenten beschrieben worden ist. Aus diesen Ergebnissen geht keine schlüssige Aussage über eine veränderte Sichtweise der Schülerinnen und Schüler durch Unterricht in Bezug auf die Erkenntnisgewinnung hervor.

6.2 Unterrichtsversuch II

Der zweite Unterrichtsversuch fand im März 2001 in einem Physikgrundkurs der 13. Jahrgangsstufe eines Kasseler Oberstufengymnasiums statt. Der Kurs bestand aus neun Schülerinnen und acht Schülern, von denen einige nicht an allen Stunden teilgenommen haben. Insgesamt wurden vier Stunden zur Einführung in das Thema Polarisation und quantenphysikalische Begriffe von mir durchgeführt. Vor und nach dem Unterricht wurde ein Fragebogen von den Schülerinnen und Schülern beantwortet.

6.2.1 Vorfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe

Der Vorfragebogen (siehe Anhang B.4) zum zweiten Unterrichtsversuch ist in seinen Grundzügen ähnlich aufgebaut, wie der in Kapitel 6.1.4 dargestellte Vorfragebogen zum ersten Unterrichtsversuch. Mit den ersten zwei Fragen soll überprüft werden, in wie weit den Schülerinnen und Schülern die Polarisation von Licht bekannt ist. Diese Frage ist von Interesse, da der geplante Unterricht zur Einführung quantenphysikalischer Begriffe auf der Grundlage von Polarisationsexperimenten mit Licht durchgeführt wird, wobei der physikalischen Beschreibung der Eigenschaft Polarisation ein relativ geringer Anteil zukommt. In weiteren Fragen werden die Schüler zur Beschreibung klassischer Bewegungsabläufe und Messungen aufgefordert. Die Antworten sollen zeigen, was die Schülerinnen und Schüler unter klassischen Objekten verstehen und wie sie sich ihrer Meinung nach verhalten. Weiterhin werden die Schülerinnen und Schüler aufgefordert, die aus dem vorangegangenen Unterricht bekannten Experimente zur Interferenz von Licht und zum Photoeffekt zu beschreiben. Die daran anschließende Frage „Was ist denn nun Licht wirklich?“ soll die Schülerinnen und Schüler wie im ersten Unterrichtsversuch provozieren, sich zu äußern, was das Licht ihrer Meinung nach wirklich ist. Dabei soll überprüft werden, in wie weit ein Modell von der Realität unterschieden wird. Zu der Frage 6 „Was sind für Sie besondere Teilchen/Objekte in der Physik?“ werden als Antworten beispielsweise Elektron, Proton, Atom oder Neutron erwartet. Überprüft werden soll wiederum, ob die Schülerinnen und Schüler diesen Teilchen eine andere Kategorie, im Gegensatz zu den klassischen Teilchen zuordnen. In einer weiteren Frage werden die Schülerinnen und Schüler aufgefordert, eine Rangfolge für vorgegebene Begriffe für eine Definition der Wahrscheinlichkeit anzugeben. Dabei soll herausgefunden werden, ob die Schülerinnen und Schüler den Begriff der Wahrscheinlichkeit mit einer Art von Ungewissheit verbinden. Da es bei den Ergebnissen von quantenphysikalischen Experimenten um die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses geht, ist von Bedeutung, ob die Schülerinnen und Schüler der deterministischen Deutung eine Vorhersagbarkeit zuordnen.

In zwei wissenschaftstheoretischen Fragen soll die bei den Schülerinnen und Schülern vorherrschende Vorstellung über den Erkenntnisprozess in der Physik ermittelt werden. Zum einen stellen die Antworten den bevorzugten Erkenntnisweg dar, und zum anderen sollen die Wahrheitskriterien erfasst werden, die Schülerinnen und Schüler bezüglich physikalischer Theorien vermuten.

6.2.2 Ergebnisse des Vorfragebogens

Insgesamt haben 17 Schülerinnen und Schüler an der Beantwortung des Vorfragebogens teilgenommen. Allerdings haben einige der Schüler nicht alle Fragen beantwortet.

Aus der Beantwortung der ersten Frage geht hervor, dass neun Schülerinnen und Schüler bereits von Polarisation, unter anderem im Zusammenhang mit optischer Aktivität, gehört haben. Allerdings haben 11 von ihnen noch keine Polarisationsfolie gesehen. Auf die Frage zu klassischen Objekten haben fast alle Schülerinnen und Schüler die Bewegungsgleichungen richtig angewandt und ausgeschlossen, dass eine Geschwindigkeitsmessung das Objekt beeinflusst. Zehn bzw. 11 Schülern waren Interferenzversuche bzw. Photoeffekt bekannt. Auf die Frage, was Licht wirklich ist, argumentierten sieben Schüler sowohl mit dem Wellenmodell als auch mit dem Teilchenmodell von Licht. Als besondere Teilchen in der Physik wurden am häufigsten Photonen benannt. Der größte Teil der Schülerinnen und Schüler ordnete der Wahrscheinlichkeit Begriffe wie „Voraussagbarkeit“ oder „mathematische Berechnung“ zu. Dies ist eventuell dadurch zu erklären, dass im Unterricht bereits Statistik behandelt wurde. In Bezug auf die Vorhersagbarkeit von Ergebnissen physikalischer Experimente sind 13 Schülerinnen und Schüler der Meinung, dass die Ergebnisse grundsätzlich nicht vorhersagbar sind.

Der überwiegende Teil der Schüler hat die wissenschaftstheoretischen Fragen dahingehend beantwortet, dass physikalische Erkenntnisse aus langen Versuchsreihen abgeleitet werden.

6.2.3 Inhalte des Unterrichts zur Einführung quantenphysikalischer Begriffe

In der ersten Stunde des Unterrichts zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe wurde die Erzeugung und Beschreibung von polarisiertem Licht behandelt. Dazu führten die Schülerinnen und Schüler selbst Experimente durch, die als Demonstrationsexperimente wiederholt wurden. Der elektrische Feldvektor wurde zur Beschreibung der Polarisation als Elongation der elektromagnetischen Welle eingeführt. Die Wirkungsweise eines Polarisationsfilters auf Licht wurde mit der Komponentenerlegung des elektrischen Feldvektors beschrieben. In der daran anschließenden Doppelstunde wurde der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feldvektor und der zu beobachtenden Intensität hinter einem Polarisationsfilter erarbeitet. Dazu wurde als Zwischenergebnis festgehalten, dass die Lage des elektrischen Feldvektors, der sich aus der Komponentenerlegung ergibt, die Polarisationsrichtung des Lichts anzeigt und die Länge des elektrischen Feldvektors ein Maß für die Intensität ist.

Im quantitativen Experiment wurde aus den Messwerten einer Messreihe das Malussche Gesetz und der quadratische Zusammenhang zwischen elektrischem Feldvektor und Intensität ermittelt. In der letzten Stunde wurden die bereits durchgeführten Experimente zur Polarisation von Licht in der Teilchenvorstellung gedeutet. Die Diskussion um polarisierte Photonen sollte dazu führen, dass es aussichtslos ist, sich eine konkrete Vorstellung von einem polarisierten Photon zu machen. Ein Ausweg wurde durch die Einführung des Zustandsbegriffs angeboten, der über die Beschreibung von vielen Photonen Rückschlüsse auf das einzelne Photon ermöglicht. Abschließend wurde diskutiert, wann Photonen ein bestimmter Polarisationszustand zugeordnet werden kann und was das für den Vorgang der Messung von Mikroobjekten bedeutet.

6.2.4 Nachfragebogen zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe

Der Nachfragebogen (siehe Anhang B.5) wurde eine Woche nach dem Unterricht von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet. Die ersten zwei Fragen des Nachfragebogens bezogen sich auf eine Beurteilung des erlebten Unterrichts. In der dritten Frage wurde nach dem Interesse der Schülerinnen und Schüler an dem Thema Quantenphysik gefragt. Drei weitere Fragen wurden im Sinne einer Leistungsüberprüfung der im Unterricht behandelten Inhalte gestellt. Dabei ging es um die Komponentenzersetzung des elektrischen Feldvektors und um das Malussche Gesetz. Daran anschließend wurden zwei Fragen zur Erzeugung bzw. Bestimmung des Polarisationszustandes von Photonen durch Polarisationsfilter gestellt. Abschließend wurden dieselben wissenschaftstheoretischen Fragen wie im Vorfragebogen gestellt.

6.2.5 Ergebnisse Nachfragebogen

Insgesamt haben 11 Schülerinnen und Schüler den Nachfragebogen bearbeitet. Das Thema Quantenphysik wurde von der Hälfte der Schülerinnen und Schüler als interessant eingestuft. Die Komponentenzersetzung des elektrischen Feldvektors wurde von neun Schülerinnen und Schülern richtig durchgeführt, was darauf schließen lässt, dass das Verfahren der Projektion des elektrischen Feldvektors auf die Durchlassachse nachvollzogen werden konnte. Im Gegensatz dazu wurde das Malussche Gesetz, das aus einer im Unterricht durchgeführten Messung abgeleitet wurde, von keinem Schüler richtig wiedergegeben. Der quadratische Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feldvektor und der Intensität des durch einen

Polarisationsfilter gehenden Lichts wurde von sechs der 11 Schülerinnen und Schüler richtig beschrieben.

In der Frage zum Durchgang von Photonen durch zwei Polarisationsfilter sollte überprüft werden, ob die Schülerinnen und Schüler das Verhalten der Photonen in einem Zusammenhang mit dem „Messinstrument“ Polarisationsfilter bringen. Alle Schüler beantworteten diese Frage in Bezug auf zwei parallele Polarisationsfilter richtig, allerdings erkannte nur ein Schüler, dass Photonen sich ebenfalls identisch verhalten, wenn der zweite Polarisationsfilter gekreuzt ist. Neun Schülerinnen und Schüler geben den richtigen Zusammenhang zwischen Polarisationsfilter und Polarisationszustand an, in dem sie zustimmten, dass ein Polarisationsfilter einen bestimmten Polarisationszustand erzeugt. Allerdings sehen nur fünf Schüler in einem Polarisationsfilter ein Messinstrument, mit dem man einen Polarisationszustand überprüfen kann.

Die wissenschaftstheoretischen Fragen wurden von den Schülerinnen und Schülern in einer vergleichbaren Weise wie im Vorfragebogen beantwortet. Die Schülerinnen und Schüler sehen in der Durchführung eines Experiments bzw. langer Versuchsreihen den wichtigsten physikalischen Erkenntnisweg.

6.3 Ergebnis der Unterrichtsversuche

Die Unterrichtsversuche sowie die Evaluation sollten eine Einschätzung darüber geben, ob die gewählten Unterrichtsinhalte vermittelbar und die Experimente durchführbar sind und damit den Schülerinnen und Schülern ein Einblick in das quantenphysikalische Verhalten der Mikroobjekte ermöglicht wird. Dabei zeigte sich, dass die Haidinger-Büschel in einfachen Schülerexperimenten von den Schülerinnen und Schülern des ersten Unterrichtsversuches trotz ihrer relativ schwachen Erscheinung erkannt und beobachtet werden konnten. Das Wahrnehmen dieses Polarisationsphänomens spielt zu Beginn des Unterrichtskonzeptes eine wichtige Rolle, da es die eigene Wahrnehmung mit der physikalischen Beschreibung der Polarisation verbindet. Die graphische Konstruktion der Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors fiel den Schülerinnen und Schülern beider Unterrichtsversuche leicht. Allerdings hatten die Schülerinnen und Schüler des zweiten Unterrichtsversuches im Unterricht zum Teil Schwierigkeiten mit der richtigen Anwendung der dabei benutzten trigonometrischen Funktionen. Die Komponentenzerlegung des elektrischen Feldvektors ist für den weiteren Verlauf von großer Bedeutung, da sie bei der Deutung der Experimente in

der Photonenvorstellung wieder aufgegriffen wird und zur Wahrscheinlichkeitsamplitude bzw. zur Wahrscheinlichkeit führt.

Sowohl die Schülerexperimente als auch die Demonstrationsexperimente erwiesen sich in beiden Unterrichtsversuchen als durchführbar. Dadurch dass Polarisationsfolien in Diarahmen eingespannt wurden, konnte jeder Schüler mit einer eigenen Folie experimentieren bzw. die Folie seines Nachbarn zu weiteren Untersuchungen ausleihen. Die Demonstrationsexperimente, die zum Malusschen Gesetz führten, konnten reproduzierbar wiederholt werden und wurden im zweiten Unterrichtsversuch von Schülern durchgeführt.

Der Übergang von den real durchgeführten Experimenten zu den Gedankenexperimenten, in denen die Versuche mit einzelnen Photonen durchdacht wurden, machte den Schülerinnen und Schülern keine Schwierigkeiten. In beiden Unterrichtsversuchen wurde über die Deutung der Polarisationsexperimente in der Photonenvorstellung lebhaft diskutiert. In diesen Diskussionen wurde der Zustandsbegriff entwickelt, allerdings erkannten nur ein Teil der Schülerinnen und Schüler an, dass ein Polarisationsfilter einen Polarisationszustand sowohl erzeugt als auch überprüft. Aus den Antworten der Schülerinnen und Schüler in Bezug auf den Wahrscheinlichkeitsbegriff lässt sich aber schließen, dass sie die statistischen Aussagen der quantenphysikalischen Experimente und den Rückschluss von vielen Photonen auf ein einzelnes Photon akzeptierten.

Da der Unterricht in beiden Kursen auf wenige Stunden beschränkt war, konnten nur sehr wenige quantenphysikalische Begriffe behandelt werden. Dazu gehörten der Zustandsbegriff, der Begriff der Wahrscheinlichkeit sowie die Wahrscheinlichkeitsamplitude. Im Unterrichtsgespräch zur Definition des Zustandsbegriffs entstand in beiden Kursen der Eindruck, dass die Schülerinnen und Schüler einen prinzipiellen Unterschied zu der klassischen Beschreibung der Experimente erkannten.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob ein Lernweg für den Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe konstruiert werden kann, der von einem lebensnahen Kontext und der eigenen Wahrnehmung ausgehend einen Zugang zu quantenphysikalischen Begriffen und Prinzipien ermöglicht.

Für die Entwicklung eines solchen Lernweges mussten zum einen Entscheidungen darüber getroffen werden, welche fachlichen Inhalte sich für ein solches Vorhaben eignen und zum anderen auf welchem methodischen Weg dieses Vorhaben umgesetzt werden kann. Aus fachlicher Sicht wurden dazu bestimmte Begriffe und Prinzipien herausgearbeitet, die das Grundlegende des quantenphysikalischen Verhaltens auf elementarer Ebene beschreiben. Zu diesen Begriffen und Prinzipien zählten der Polarisationszustand, die Wahrscheinlichkeit, die Wahrscheinlichkeitsamplitude sowie das Superpositionsprinzip und das Fundamentalprinzip. In einem weiteren Schritt wurden diese Begriffe und Prinzipien mit Hilfe von Analogiebetrachtungen und geeigneten Experimenten auf ein für den Schulunterricht angemessenes Niveau umgesetzt.

Die fachlichen Inhalte des Lernweges wurden durch ein methodisches Vorgehen strukturiert, das über drei Stufen unterschiedlicher Anschaulichkeit bzw. Abstraktion führte. Dabei stand die Verwendung einer Modellbeschreibung im Vordergrund, die es durch ihre Tragfähigkeit ermöglichte, eine Verbindung zwischen den anschaulichen und den abstrakten Inhalten des Lernweges herzustellen. Unabhängig von der Einführung neuer Begriffe zur Beschreibung quantenphysikalischen Verhaltens konnte gezeigt werden, dass ein Unterrichtskonzept realisiert werden kann, das sowohl an das eigene Erleben angebunden ist als auch einen Zugang zur Quantenphysik ermöglicht. Dabei liegt der entscheidende Unterschied zwischen dem Ansatz der vorliegenden Arbeit und der unterrichtsüblichen Vorgehensweise sowie anderer fachdidaktischer Ansätze darin, dass innerhalb des Lernweges alle Stufen der Beschreibung einen gemeinsamen Ausgangspunkt haben und aufeinander aufbauen.

Für die Umsetzung des Unterrichtskonzeptes wurde die Navigation von Insekten nach dem polarisierten Himmelslicht als Einstieg gewählt, der das Thema Polarisation von Licht in einen fächerübergreifenden Kontext einbettet. Mit Hilfe von einfachen qualitativen Schüler-

experimenten wurde das polarisierte Licht und dessen Polarisationsrichtung in Form der Haidinger-Büschel wahrgenommen, wodurch dieser physikalische Inhalt an das eigene Erleben der Schülerinnen und Schüler angebunden wurde. Bereits auf dieser phänomennahen Ebene wurde das polarisierte Licht mit Hilfe des elektrischen Feldvektors beschrieben, dessen Ausrichtung vergleichbar zur Lage der Haidinger-Büschel die Polarisationsrichtung des Lichts charakterisiert.

Im weiteren Verlauf des Unterrichtskonzeptes wurde mit Hilfe von quantitativen Messungen in Demonstrationsexperimenten das Malussche Gesetz und der quadratische Zusammenhang zwischen Intensität und elektrischem Feldvektor hergeleitet. Auf dieser quantitativen Ebene der Beschreibung wurde das Modell des elektrischen Feldvektors in Verbindung mit der Messgröße Intensität behandelt. Die Erklärungsmächtigkeit des Modells wurde dann durch die Beschreibung von Interferenzexperimenten mit polarisiertem Licht vergrößert und führte zum Superpositionsprinzip der elektrischen Feldvektoren.

Das Malussche Gesetz, der quadratische Zusammenhang zwischen elektrischem Feldvektor und Intensität sowie das Superpositionsprinzip wurden im weiteren Verlauf des Unterrichtsganges bei der Beschreibung der Polarisationsexperimente in der Photonenvorstellung wieder aufgegriffen und im Sinne einer quantenphysikalischen Beschreibung gedeutet. Dazu wurden die bereits durchgeführten Polarisationsexperimente nochmals als Gedankenexperimente durchdacht, wobei für eine Beschreibung des Verhaltens der Photonen neue Begriffe im Unterricht eingeführt werden mussten. Als erster Begriff wurde der Polarisationszustand zur Beschreibung der Polarisations-eigenschaft der Photonen definiert, der den Zusammenhang zwischen Zustand und quantenphysikalischem Messprozess verdeutlicht. Das Malussche Gesetz führte in der Photonenvorstellung über eine statistische Deutung der Polarisationsexperimente zum Wahrscheinlichkeitsbegriff der Quantenphysik.

Bei der Beschreibung der Interferenzexperimente mit einzelnen Photonen wurde die Notwendigkeit eines Analogons zum elektrischen Feldvektor deutlich. Auf dieser abstrakten Stufe der Beschreibung wurde der elektrische Feldvektor zum Modell der Wahrscheinlichkeitsamplitude weiterentwickelt, das in der Beschreibung quantenphysikalischen Verhaltens eine zentrale Rolle spielt. Die Interferenzexperimente konnten dann durch das Superpositionsprinzip der Wahrscheinlichkeitsamplituden in der Photonenvorstellung beschrieben werden. Zuletzt wurde das quantenmechanische Fundamentalprinzip, das das quantenphysikalische Verhalten auf fundamentaler Ebene beschreibt, anhand des Lokalisationsproblems einzelner Photonen entwickelt.

Das hier vorgestellte Unterrichtskonzept bedarf zu seiner Umsetzung im Schulunterricht einer weiteren Konkretisierung durch die unterrichtende Lehrkraft selbst. Allerdings haben die durchgeführten Unterrichtsversuche gezeigt, dass wesentliche Teile des Konzeptes direkt in den Unterricht übernommen werden können.

Eine Weiterführung der dargestellten Arbeiten könnte in der Ausweitung auf weitere quantenphysikalische Inhalte bestehen, um die Tragweite dieses Ansatzes besser beurteilen zu können. Zudem könnte durch eine umfassendere empirische Untersuchung überprüft werden, ob die Schülerinnen und Schüler durch diesen Lernweg tatsächlich eine quantenphysikalische Denkweise angenommen haben.

Literaturverzeichnis

- Bader, F. (Hrsg.). (2000). Dorn/Bader Physik 12/13 Gymnasium Sek. II. Schroedel Verlag GmbH, Hannover.
- Baumann, K., R. U. Sexl. (1986). Die Deutungen der Quantentheorie. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Baumert, J. et al. (1997). TIMSS – Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich. Leske + Budrich, Opladen.
- Baumert, J. et al. (2001). PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich. Leske + Budrich, Opladen.
- Berg, A. et al. (1989). Einführung in die Quantenphysik. Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse. Pädagogisches Zentrum, Berlin.
- Berger, R. (2000). Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik – Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht. Dissertationsschrift der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Bleichroth, W. et al. (1999). Fachdidaktik Physik. Aulis Verlag Deubner, Köln.
- BLK (Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung). (1997). Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“. Quelle: www.blk-bonn.de, Heft 60, Bonn.
- Boysen, G. et al. (1999). Oberstufe Physik Gesamtband. Cornelsen Verlag, Berlin.
- Brachner, A., R. Fichtner. (1977). Quantenmechanik für Lehrer und Studenten. Hermann Schroedel Verlag, Hannover, Dortmund, Darmstadt, Berlin.
- Bredthauer, W. et al. (1993). Impulse Physik 1 für die Mittelstufe der Gymnasien. Ernst Klett Schulbuchverlag GmbH, Stuttgart.
- Crawford, F.S. (1974). Berkeley Physik Kurs 3. Schwingungen und Wellen. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- De Vries, H. et al. (1953). Properties of the eye with respect to polarized light. *Physica* 19. S. 419-432.
- Dotz, E. et al. (1994). Sensorische und elektrische Antworten bei Reizung der Makula im kurzwelligigen (407-527 nm) linear polarisiertem Licht (Haidinger-Polarisationsbüschel). *Ophthalmologie* 91. S.169-175.
- Duit, R. (1995). Empirische physikdidaktische Unterrichtsforschung. *Unterrichtswissenschaft* 23, Heft 2. S. 98-106.
- Duit, R. et al. (1990). Bericht über den Workshop: Schülervorstellungen - konstruktivistische Ansätze und Lernen moderner Physik. In: K.H. Wiebel (Hrsg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie*. S. 336-337.

- Duit, R., S. Glynn. (1992). Analogien und Metaphern, Brücken zum Verständnis im schülergerechten Physikunterricht. In: P. Häußler (Hrsg.). Physikunterricht und Menschenbildung. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel.
- Engelhardt, P., H. Wiesner. (1994). Präparationsexperimente als Leitlinie einer Einführung in die Quantenphysik für Grund- und Leistungskurse. Physik in der Schule 32, Heft 7/8. S. 271-275.
- Erb, R. (1994). Optik mit Lichtwegen. Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen in der Optik. Westarp Wissenschaften, Bochum, Magdeburg.
- Erb, R. (1999). Das Thema „Optische Abbildung“ im Physikunterricht. Habilitationsschrift Universität Gesamthochschule Kassel.
- Erb, R., L. Schön. (1997). Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: H. E. Fischer (Hrsg.). Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II. Dümmlers, Bonn. S. 30-54.
- Falk, D. S. et al. (1990). Ein Blick ins Licht. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg und Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin.
- Feynman, R. P. (1988). QED – Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie. Piper, München.
- Feynman, R.P. et al. (1996). Vorlesungen über Physik. Band III Quantenmechanik. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- Fichtner, R. (1980). Das quantenmechanische Fundamentalprinzip. *physica didactica* 7, Heft 1. S. 17-33.
- Fichtner, R. (1994). Zu einem grundlegenden Prinzip in der Quantentheorie. Physik in der Schule 32, Heft 7/8. S. 244-249.
- Fick, E. (1988). Einführung in die Grundlagen der Quantenphysik. Aula Verlag, Wiesbaden.
- Fischler, H. (1992). Die Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“: Didaktische Grundsätze und inhaltliche Details. In: H. Fischler (Hrsg.). Quantenphysik in der Schule. IPN, Kiel. S. 245-252.
- Fischler, H., M. Lichtfeldt. (1994). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik. Physik in der Schule 32, Heft 7/8. S. 276-280.
- Frisch, K. von (1949). Die Polarisation des Himmelslichts als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen. *Experientia* 5. S. 142-148.
- Frisch, K. von (1965). Tanzsprache und Orientierung der Bienen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Göritz, G., H. Wiesner. (1984). Wie verstehen Schüler die Probleme der Quantenmechanik. *Praxis der Naturwissenschaften* 33, Heft 3. S. 90-92.
- Grebe-Ellis, G. et al. (2002). Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation. Materialien für einen modellfreien Optikunterricht im Grund- und Leistungskurs Physik. Bildungswerk Beruf und Umwelt, Kassel.
- Grehn, J. (Hrsg.). (1998). Metzler Physik. Schroedel Schulbuchverlag, Hannover.

- Greiner, W. (1989). Quantenmechanik. Teil 1 Einführung. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Haidinger, W. (1844). Ueber das directe Erkennen des polarisirten Lichts und der Lage der Polarisationsebene. *Annalen der Physik und Chemie* 63, S. 29-39.
- Häußler, P. (1992). Physikalische Bildung als Menschenbildung: Wunsch und Wirklichkeit. In: P. Häußler (Hrsg.). *Physikunterricht und Menschenbildung*. IPN, Kiel.
- Häußler, P. et al. (1983). Physikalische Bildung für heute und morgen. Ergebnisse einer curricularen Delphi-Studie. *Praxis der Naturwissenschaften* 32, Heft 12 (Beilage).
- Häußler, P. et al. (1998). Perspektiven für die Unterrichtspraxis. IPN, Kiel.
- Häußler, P., L. Hoffmann. (1995). Physikunterricht – an den Interessen von Jungen und Mädchen orientiert. *Unterrichtswissenschaft* 23, Heft 2. S. 107-126.
- Heber, I. (1998): Physikunterricht an Schulen: Wie wird er effizienter? *Physikalische Blätter* 54, Heft 4, S. 314-316.
- Hecht, E. (1989). *Optik*. Addison-Wesley, Bonn.
- Hennemann, U., U. Backhaus. (1999). Theoretische und praktische Ansätze zur Stereophotographie. In: DPG Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.). *Tagungsbandbeitrag*. S. 339-334.
- Hessisches Kultusministerium (Hrsg.). (1994). *Kursstrukturpläne: Gymnasiale Oberstufe*, Wiesbaden.
- Hessisches Kultusministerium (Hrsg.). (1996). *Rahmenplan Physik: Sekundarstufe I*, Wiesbaden.
- Hoeppe, G. (1999). *Blau. Die Farbe des Himmels*. Spektrum Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Hoffmann, L., M. Lehrke. (1986). Eine Untersuchung über Schülerinteressen in Physik und Technik. *Zeitschrift für Pädagogik* 32. S. 189-204.
- Horváth, G. et al. (1998). Polarization Portrait of the Arago Point: Video-polarimetric Imaging of the Neutral Points of Skylight Polarisation. *Naturwissenschaften* 85, S. 333-339.
- Huhn, B. et al. (1997). *Optische Wahrnehmung. Ein lehrplanorientierter Unterrichtsvorschlag zum fächerverbindenden Unterricht in den Fächern Biologie und Physik*. Landesinstitut Schleswig-Holstein für Praxis und Theorie der Schule (IPTS), Kronshagen.
- Hund, F. (1996). *Geschichte der physikalischen Begriffe*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.
- Jung, W. (1981). Erhebungen zu Schülervorstellungen in Optik (Sekundarstufe I). *physica didactica* 8. S. 137-153.
- Kattmann, U. et al. (1997). Das Modell der didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3, Heft 3. S. 3-18.
- Kircher, E. et al. (2000). *Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis*. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden.

- Köhnlein, W. (Hrsg.). (1998). Der Vorgang des Verstehens. Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- Krüger, U.-H., H. Schecker. (1982). Das Bild von der Wissenschaft Physik – Ergebnisse empirischer Untersuchungen zu wissenschaftstheoretischen Fragestellungen bei Schülern und Lehrern der Sekundarstufe II. Der Physikunterricht 16, Heft 2. S. 78ff.
- Kuhn, W. (1991). Die wissenschaftstheoretische Dimension der Physik. In: H. Wiesner (Hrsg.). Aufsätze zur Didaktik der Physik II. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth.
- Kuhn, W. (Hrsg.). (1998). Physik. Band II. 2. Teil: Klasse 12/13. Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig.
- Lichtfeldt, M. (1991). Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht. Naturwissenschaften und Unterricht - Didaktik im Gespräch, Band 15. Westarp Wissenschaften, Essen.
- Lochhaas, H. (1996). Möglichkeiten und Grenzen fächerverbindenden Unterrichts. MNU 8, Heft 49. S. 493-496.
- Macdonald, R. (1997). Liquid Crystal Displays – Flüssigkristalle und deren Anwendung in modernen Flachbildschirmen. In: DPG Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.). Tagungsbandbeitrag. S. 85-98.
- Mitter, H. (1969). Quantentheorie. Bibliographisches Institut. Hochschultaschenbücher-Verlag, Mannheim, Wien, Zürich.
- MNU (Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V.). (2001). Physikunterricht und naturwissenschaftliche Bildung -aktuelle Anforderungen-: Empfehlungen zur Gestaltung von Lehrplänen bzw. Richtlinien für den Physikunterricht. MNU, Heft 3 (Beilage).
- Muckenfuß, H. (1995). Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts. Cornelsen Verlag, Berlin.
- Müller, R., H. Wiesner. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Physik in der Schule 38, Heft 2. S. 126-134.
- Müller, R., H. Wiesner. (2001). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik: Erste empirische Ergebnisse. In: R. Brechel (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie, Dortmund. S. 342-344.
- Niedrig, H. (Hrsg.). (1993). Bergmann-Schäfer. Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 3 Optik. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Pfundt, H., R. Duit. (1998). Bibliography – STCSE: Students´ and Teachers´ Conceptions and Science Education. <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>.
- Rae, A. I. M. (1996). Quantenphysik: Illusion oder Realität? Phillip Reclam jun., Stuttgart.
- Raith, W. (1999). Bergmann – Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2. Elektromagnetismus. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Rieck, K. (1998). Polarisation wahrnehmen. In: R. Brechel (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie, Essen. S. 283-285.

- Rieck, K. (1999). Polarisierung und optische Aktivität. In: R. Brechel (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie, München. S. 306-308.
- Rieck, K. (2001). Einführung quantenphysikalischer Begriffe mit Hilfe von Polarisierungsexperimenten. In: R. Brechel (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie, Dortmund.
- Rossel, S. (1987). Das Polarisationssehen der Biene. *Naturwissenschaften* 74, S. 53-62.
- Salm, W. (1999). Zugänge zur Quantentheorie. Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln.
- Schecker, H. et al. (1996). Naturwissenschaftlicher Unterricht im Kontext allgemeiner Bildung. *MNU* 8, Heft 49. S. 489-492
- Schwarze, H. (1997). Fächerübergreifend, fächerverbindend, Fortschritt mit Niveau? Praxis der Naturwissenschaften 46, Heft 7. S. 1.
- Simonyi, K. (1995). Kulturgeschichte der Physik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Spreckelsen, K. (2001). Ursprüngliches Verstehen im Sachunterricht auf der Grundlage von Simultanexperimenten. In: D. Cech, B. Feige, J. Kahlert, G. Löffler, H. Schreier, H.-J. Schwier, U. Stoltenberg (Hrsg.). Die Aktualität der Pädagogik Martin Wagenscheins für den Sachunterricht. Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn. S. 135-144.
- Todt, E., B. Händel. (1988). Analyse der Kontextabhängigkeit von Physikinteressen. *MNU* 41, Heft 3. S. 137-140.
- Vogel, H. (1995). Gerthsen Physik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Vollmer, G. (1984). Jenseits des Mesokosmos. Anschaulichkeit in Physik und Didaktik. *Der Physikunterricht* 18. Heft 1. S. 5-22.
- Wagenschein, M. (1965). Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken. Band I. Ernst Klett Verlag, Stuttgart.
- Wagenschein, M. (1970). Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken. Band II. Ernst Klett Verlag, Stuttgart.
- Wagenschein, M. (1983). Erinnerungen für morgen: Eine pädagogische Autobiographie. Beltz Verlag, Weinheim und Basel.
- Wagenschein, M. (1989). Rettet die Phänomene. In: Erinnerungen für morgen. Beltz Verlag, Weinheim und Basel.
- Wagenschein, M. (1997). Verstehen lehren. Beltz Verlag, Weinheim und Basel.
- Waldeyer, A. (1972). Anatomie des Menschen. Band II. Walter De Gruyter, Berlin, New York.
- Wehner, R. (1998). Der Himmelskompaß der Wüstennameisen. *Spektrum der Wissenschaft* 11. S. 56- 67.
- Werner, J. (2000). Vom Licht zum Atom: Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells. Logos Verlag, Berlin.
- Wiesner, H. (1989). Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe. *Naturwissenschaften und Unterricht*, Band 2. Westarp Wissenschaften, Essen.

-
- Wiesner, H. (1992). Eine Einführung in die Quantentheorie für Leistungskursschüler: Konzeption und erste unterrichtliche Erfahrungen. In: H. Fischler (Hrsg.). Quantenphysik in der Schule. IPN, Kiel. S. 270-290.
- Wiesner, H. (1994). Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. Naturwissenschaften im Unterricht 5, Heft 22. S. 7-15.
- Willer, J. (1990). Physik und menschliche Bildung: eine Geschichte der Physik und ihres Unterrichts. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Zenker, W., Ch. Zenker. (1985). Das Sehorgan. In: A. Benninghoff (Hrsg.). Makroskopische und mikroskopische Anatomie des Menschen. Band III. Urban & Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore.

Anhang

A. Berechnung des Verhältnisses der Intensität von unpolarisiertem einfallenden Licht und linear polarisiertem Licht

Das einfallende Licht wird zusammengesetzt aus einer horizontalen und einer vertikalen Komponente dargestellt:

$$I_0 = \int_0^{2\pi} \left(\underbrace{E_0^2 \sin^2 \alpha}_{I_{0x}} + \underbrace{E_0^2 \cos^2 \alpha}_{I_{0y}} \right) d\alpha = 2\pi E_0^2$$

Dies ist die Intensität des natürlichen Lichts in Beobachtungsrichtung. Nun betrachtet man einen Polfilter, dessen Durchlassachse in y -Richtung steht:

$$I_{0y} = \int_0^{2\pi} E_0^2 \cos^2 \alpha d\alpha = \pi E_0^2$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis von einfallender Intensität zur Intensität des linear polarisierten Lichts zu:

$$\frac{I_y}{I_0} = \frac{\pi E_0^2}{2\pi E_0^2} = \frac{1}{2} = 50\%.$$

B. Fragebögen

In den folgenden Abschnitten sind die Fragebögen, die vor und nach dem Unterricht zur Polarisation von Licht bzw. zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet wurden, dargestellt.

B.1 Fragebogen vor Unterricht zur Polarisation (Unterrichtsversuch I)

<p><u>Fragebogen zum Thema Polarisation:</u></p> <p>männlich weiblich Chemie: LK: GK: Bio: LK: GK: Mathe: LK: GK: Code:</p> <p>1. Sie haben den Begriff der Polarisation im Unterricht kennen gelernt. Kannten Sie den Begriff bereits vorher aus einem anderen Zusammenhang?</p> <p>2. Wie kann man polarisiertes Licht erzeugen? Nennen Sie die Ihnen bekannten Möglichkeiten!</p> <p>3. Bienen benutzen zur Orientierung bei der Futtersuche die Sonne. In Linder Biologie steht: "Auch wenn die Sonne verdeckt ist und nur ein kleiner Fleck blauen Himmels sichtbar bleibt, können die Bienen aus der Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichts den Sonnenstand erkennen." Obwohl das natürliche Licht der Sonne unpolarisiert ist, entsteht polarisiertes Himmelslicht. Können Sie sich dieses Phänomen erklären und formulieren Sie Ihre Fragen, die sich für Sie dabei ergeben!</p> <p>4. Haben Sie schon einmal davon gehört, daß auch das menschliche Auge in der Lage ist, polarisiertes Licht zu erkennen? Was sehen Sie, wenn Sie durch eine Polarisationsfolie auf eine hell beleuchtete weiße Fläche sehen und dabei die Polarisationsfolie ununterbrochen um die Blickrichtung drehen? Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen, und versuchen Sie zu erklären, wie das Gesehene zustande kommt. Welche Fragen bleiben für Sie bei der Erklärung des Versuchs offen?</p>	<p>5. Sie kennen den Mikrowellen-Versuch, in dem ein Sender polarisierte Mikrowellen sendet, die von einem Empfänger detektiert werden. Wie muß der Drahtgitterpolarisator ausgerichtet sein, damit der Empfänger die polarisierten Mikrowellen des Senders empfängt? Zeichnen Sie die Stellung der Stäbe des Drahtgitterpolarisators ein und erläutern Sie, warum nur diese Stellung in Frage kommt!</p> <p>6. Sind die Durchlaßachsen zweier hintereinander angeordneter Polarisationsfolien um 90° gegeneinander gedreht, so kommt kein Licht durch die beiden Folien durch. Man spricht dann auch von gekreuzten Polarisationsfolien. Stellt man eine dritte Polarisationsfolie zwischen die gekreuzten Polarisationsfolien, deren Durchlaßachse um einen Winkel $\Theta = 45^\circ$ gegen die Durchlaßachse der ersten Folie gedreht ist, so erhält man Licht hinter der dritten Folie. Erklären Sie, warum eine dritte Polarisationsfolie dazu führt, daß alle Folien lichtdurchlässig werden.</p>
--	---

B.2 Fragebogen vor Unterricht zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe (Unterrichtsversuch I)

<p><u>Fragebogen</u></p> <p>männlich weiblich Chemie: LK: GK: Bio: LK: GK: Mathe: LK: GK: Code:</p> <p>1. Was sind wichtige physikalische Eigenschaften <u>ruhender</u> Körper/Objekte? Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach ihrer Wichtigkeit in die Tabelle ein! Masse, Form, potentielle Energie, Quantisierung, Ladung, Ort, Geschwindigkeit, Trägheit, Zeit, Bahn, Beschleunigung, Kräfte, Impuls, Gewicht, Volumen, kinetische Energie, (Tabelle mit den Kategorien: „sehr wichtig“, „wichtig“, „nicht so wichtig“, „unwichtig“)</p> <p>2. Was sind wichtige physikalische Eigenschaften <u>bewegter</u> Körper/Objekte? Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach ihrer Wichtigkeit in die Tabelle ein! Masse, Form, potentielle Energie, Quantisierung, Ladung, Ort, Geschwindigkeit, Trägheit, Zeit, Bahn, Beschleunigung, Kräfte, Impuls, Gewicht, Volumen, kinetische Energie, (Tabelle mit den Kategorien: „sehr wichtig“, „wichtig“, „nicht so wichtig“, „unwichtig“)</p> <p>3. Was sind besondere Objekte/Teilchen in der Physik?</p> <p>4. Eine Kugel fällt im freien Fall aus 100 Metern Höhe auf den Erdboden. Die Beschleunigung beträgt $g \approx 10 \text{ m/s}^2$. Formeln: $s = 1/2 g t^2$; $v = gt$ Beantworten Sie bitte folgende Fragen: Welche Geschwindigkeit hat die Kugel nach 10 Metern?</p> <p>Nach welcher Zeit kommt die Kugel am Boden an?</p> <p>Kann man die Geschwindigkeit in jedem Punkt des von der Kugel zurückgelegten Weges bestimmen?</p> <p>Was passiert, wenn man die Geschwindigkeit der Kugel nach 20 Metern freier Fall mit Hilfe einer Lichtschranke bestimmt? Verändert das die Zeit, nach der die Kugel auf dem Erdboden ankommt? Begründen Sie ihre Antwort.</p> <p>Dieser Versuch wird nacheinander mit 10 gleichen Kugeln durchgeführt. Hat jede Kugel die gleiche Fallzeit und Geschwindigkeit? Begründen Sie ihre Antwort!</p>	<p>5. Kann man auch die Geschwindigkeit der unter 3) angegebenen besonderen Objekte/Teilchen in jedem Punkt bestimmen? Kreuzen Sie bitte an! ja nein weiß nicht</p> <p>6. Was sind wichtige physikalische Eigenschaften von Quantenobjekten? Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach ihrer Wichtigkeit in die Tabelle ein! Masse, Form, potentielle Energie, Quantisierung, Ladung, Ort, Geschwindigkeit, Trägheit, Zeit, Bahn, Beschleunigung, Kräfte, Impuls, Gewicht, Volumen, kinetische Energie, (Tabelle mit den Kategorien: „sehr wichtig“, „wichtig“, „nicht so wichtig“, „unwichtig“)</p> <p>7. Was ist Licht?</p> <p>8. Geben Sie eine Reihenfolge von 1-8 der folgenden Aussagen an. 1 soll der Aussage zugeordnet werden, die am ehesten zutrifft. 8 ist die Aussage, die am wenigsten zutrifft. Physikalische Erkenntnisse werden gewonnen aus: der Intuition eines Physikers der theoretischen Widerlegung eines Experiments logischen Überlegungen der Durchführung eines Experiments langen Versuchsreihen mathematischen Herleitungen der Durchführung von Gedankenexperimenten der experimentellen Widerlegung eines Theoriegebildes</p> <p>9. Welche der folgenden Aussagen trifft für Sie zu? Schreiben Sie vor die einzelnen Möglichkeiten ein "ja", wenn Sie der Meinung sind, daß die Aussage zutrifft. Schreiben Sie ein "nein" vor die Aussage, wenn Sie der Meinung sind, daß sie nicht zutrifft. Wann ist eine physikalische Aussage allgemeingültig? wenn die Aussage aus einem allgemeinen Gesetz folgt, wenn die Aussage experimentell bestätigt ist, wenn Folgerungen aus der Aussage bestätigt sind, wenn die Aussage nicht widerlegt worden ist, wenn Folgerungen aus der Aussage nicht widerlegt wurden, wenn die Aussage das Ergebnis der methodisch einwandfreien Arbeit eines genialen Physikers ist, wenn der Aussage alle kompetenten Physiker zustimmen.</p>
--	---

B.3 Fragebogen nach Unterricht zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe (Unterrichtsversuch I)

Fragebogen	
<p>männlich weiblich Chemie: LK: GK: Bio: LK: GK: Mathe: LK: GK: Code:</p> <p>1. Auf einer optischen Bank sind eine Experimentierlampe und zwei Polarisationsfilter hintereinander angeordnet. Durch den ersten Polarisationsfilter geht Licht hindurch, dessen Lage der Polarisationssebene gekennzeichnet wird durch den elektrischen Feldvektor E_0. Bestimmen Sie graphisch die Länge des elektrischen Feldvektors E_α nach Durchgang durch einen zweiten Polarisationsfilter, dessen Durchlaßachse um den Winkel $\alpha=45^\circ$ gegen die Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters gedreht ist.</p> <p>Geben Sie die Formel an, mit der man E_α berechnen kann!</p> <p>2. Welche Proportionalität besteht allgemein zwischen der Intensität des Lichts und dem elektrischen Feldvektor E?</p> <p>3. Geben Sie die Formel an, mit der man die Intensität bestimmen kann, die durch den zweiten Polarisationsfilter hindurch kommt, dessen Durchlaßachse wie oben um den Winkel $\alpha=45^\circ$ gegen die Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters verdreht ist! (Malussches Gesetz)</p> <p>4. Auf einer optischen Bank sind eine Experimentierlampe und zwei Polarisationsfilter hintereinander angeordnet. Die Durchlaßachse des zweiten Polarisationsfilters ist um den Winkel $\alpha=45^\circ$ gegen die Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters verdreht. Passieren 1000 Photonen diese Anordnung, so werden nach dem Malusschen Gesetz 500 Photonen absorbiert und 500 durchgelassen. Was passiert, wenn statt der 1000 Photonen nur ein Photon betrachtet wird? Kommt das Photon durch, oder wird es absorbiert?</p>	<p>5. a) Mit einem Polarisationsfilter kann man Photonen in einen bestimmten Polarisationszustand bringen. stimmt stimmt nicht weiß nicht</p> <p>b) Auf einer optischen Bank sind eine Experimentierlampe und zwei Polarisationsfilter hintereinander angeordnet. Wann verhalten sich die Photonen beim Durchgang durch diese Anordnung alle gleich? Kreuzen Sie bitte an! Wenn, die Durchlaßachse des zweiten Polarisationsfilters parallel zur Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters ist. die Durchlaßachse des zweiten Polarisationsfilters um einen Winkel von 45° zur Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters verdreht ist. die Durchlaßachse des zweiten Polarisationsfilters senkrecht zur Durchlaßachse des ersten Polarisationsfilters ist.</p> <p>c) Photonen mit gleichem Polarisationszustand verhalten sich immer gleich. stimmt stimmt nicht weiß nicht</p> <p>d) Das Verhalten eines einzelnen Photons kann nur mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit beschrieben werden. stimmt stimmt nicht weiß nicht</p> <p>e) Diese Wahrscheinlichkeit kann nicht berechnet werden. stimmt stimmt nicht weiß nicht</p> <p>f) Die Intensität des Lichts ist analog zur Wahrscheinlichkeit einzelner Photonen. stimmt stimmt nicht weiß nicht</p> <p>6. Geben Sie eine Reihenfolge von 1-8 der folgenden Aussagen an. 1 soll der Aussage zugeordnet werden, die am ehesten zutrifft. 8 ist die Aussage, die am wenigsten zutrifft. Physikalische Erkenntnisse werden gewonnen aus: der Intuition eines Physikers der theoretischen Widerlegung eines Experiments logischen Überlegungen der Durchführung eines Experiments langen Versuchsreihen mathematischen Herleitungen der Durchführung von Gedankenexperimenten der experimentellen Widerlegung eines Theoriegebildes</p> <p>7. Welche der folgenden Aussagen trifft für Sie zu? Schreiben Sie vor die einzelnen Möglichkeiten ein "ja", wenn Sie der Meinung sind, daß die Aussage zutrifft. Schreiben Sie ein "nein" vor die Aussage, wenn Sie der Meinung sind, daß sie nicht zutrifft. Wann ist eine physikalische Aussage allgemeingültig? wenn die Aussage aus einem allgemeinen Gesetz folgt, wenn die Aussage experimentell bestätigt ist, wenn Folgerungen aus der Aussage bestätigt sind, wenn die Aussage nicht widerlegt worden ist, wenn Folgerungen aus der Aussage nicht widerlegt wurden, wenn die Aussage das Ergebnis der methodisch einwandfreien Arbeit eines genialen Physikers ist, wenn der Aussage alle kompetenten Physiker zustimmen.</p>

B.4 Fragebogen vor Unterricht zu quantenphysikalischen Begriffen (Unterrichtsversuch II)

<p><u>Fragebogen</u> Bitte beantworten Sie diesen Fragebogen möglichst ausführlich und ehrlich. Sie sollen mit diesen Fragen nicht geprüft werden. Ihre Antworten helfen mir, einen Eindruck von Ihren Vorstellungen zu den folgenden Fragen zu bekommen. Falls Sie für die Beantwortung mehr Platz benötigen, schreiben Sie bitte auf der Rückseite weiter. Alle Antworten bleiben anonym. Vielen Dank!</p> <p>männlich: weiblich: Chemie: LK: GK: Bio: LK: GK: Mathe: LK: GK:</p> <p>1. Haben Sie schon einmal von Polarisation gehört? Wenn ja, in welchem Zusammenhang?</p> <p>2. Haben Sie schon einmal eine Polarisationsfolie gesehen? Wenn ja, was macht diese?</p> <p>3. Eine Kugel fällt im freien Fall aus 100 Metern Höhe auf den Erdboden. Setzen Sie $g = 10 \text{ m/s}^2$. Formeln: $s = 1/2 g t^2$; $v = gt$ Beantworten Sie bitte folgende Fragen unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes: Welche Geschwindigkeit hat die Kugel nach 10 Metern?</p> <p>Nach welcher Zeit kommt die Kugel am Boden an?</p> <p>Kann man die Geschwindigkeit der Kugel in jedem Punkt des von ihr zurückgelegten Weges bestimmen?</p> <p>Nehmen Sie an, dass man die Geschwindigkeit der Kugel nach 20 Metern freier Fall mit Hilfe einer Lichtschranke bestimmt. Verändert das die Zeit, nach der die Kugel auf dem Erdboden ankommt? Begründen Sie Ihre Antwort.</p> <p>Dieser Versuch wird nacheinander mit 10 gleichen Kugeln durchgeführt. Hat jede Kugel die gleiche Fallzeit und Geschwindigkeit? Begründen Sie Ihre Antwort!</p> <p>Unter welchen Voraussetzungen tritt Interferenz auf? Erklären Sie das Zustandekommen von Interferenzmustern!</p> <p>4. Sie haben den Photoeffekt bereits im Unterricht behandelt. Was lernt man aus den Versuchen zum Photoeffekt über das Verhalten von Licht?</p>	<p>5. Man kann das Verhalten von Licht sowohl im Wellenmodell als auch im Teilchenmodell beschreiben. Was ist Licht denn nun wirklich?</p> <p>6. Was sind für Sie besondere Objekte/Teilchen in der Physik?</p> <p>7. Was sagt Ihrer Meinung nach der Begriff „Wahrscheinlichkeit“ aus? Kreuzen Sie bitte an! (Vierstufiges Ranking für die Begriffe: Zufall, Ungenauigkeit, Voraussagbarkeit, Statistik, mathematische Berechnung, Ungewissheit)</p> <p>8. Glauben Sie, dass Ergebnisse von physikalischen Experimenten grundsätzlich vorhersagbar sind? ja: nein: Begründen Sie, warum Sie dieser Meinung sind:</p> <p>9. Geben Sie eine Reihenfolge von 1-8 der folgenden Aussagen an. 1 soll der Aussage zugeordnet werden, die am ehesten zutrifft. 8 ist die Aussage, die am wenigsten zutrifft. Physikalische Erkenntnisse werden gewonnen aus: Nr.:__ der Intuition eines Physikers Nr.:__ der theoretischen Widerlegung eines Experiments Nr.:__ logischen Überlegungen Nr.:__ der Durchführung eines Experiments Nr.:__ langen Versuchsreihen Nr.:__ mathematischen Herleitungen Nr.:__ der Durchführung von Gedankenexperimenten Nr.:__ der experimentellen Widerlegung eines Theoriegebildes</p> <p>10. Welche der folgenden Aussagen trifft für Sie zu? Kreuzen Sie bitte an! Wann ist eine physikalische Aussage allgemeingültig? (Vierstufiges Ranking für folgende Aussagen) wenn die Aussage aus einem allgemeinen Gesetz folgt, wenn die Aussage experimentell bestätigt ist, wenn Folgerungen aus der Aussage bestätigt sind, wenn die Aussage nicht widerlegt worden ist, wenn Folgerungen aus der Aussage nicht widerlegt wurden, wenn die Aussage das Ergebnis der methodisch einwandfreien Arbeit eines genialen Physikers ist, wenn der Aussage alle kompetenten Physiker zustimmen</p>
---	---

B.5 Fragebogen nach Unterricht zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe (Unterrichtsversuch II)

<p><u>Fragebogen</u> Bitte beantworten Sie diesen Fragebogen möglichst ausführlich und ehrlich. Falls Sie für die Beantwortung mehr Platz benötigen, schreiben Sie bitte auf der Rückseite weiter. Alle Antworten bleiben anonym. Vielen Dank!</p> <p>männlich: weiblich: Chemie: LK: GK: Bio: LK: GK: Mathe: LK: GK:</p> <p>1. Was hat Ihnen am Unterricht gut gefallen?</p> <p>2. Was hat Ihnen am Unterricht nicht gefallen?</p> <p>3. Das Thema „Quantenphysik“ finde ich interessant. Kreuzen Sie bitte an! (Vierstufiges Ranking von „trifft genau zu“ bis „trifft nicht zu“, weitere Möglichkeit: weiß nicht)</p> <p>4. Auf einer optischen Bank sind eine Experimentierlampe und zwei Polarisationsfilter hintereinander angeordnet. Die Lage der Polarisationsebene des Lichts hinter dem ersten Polarisationsfilter wird gekennzeichnet durch den elektrischen Feldvektor. Bestimmen Sie graphisch die Länge und Lage des elektrischen Feldvektors nach Durchgang durch einen zweiten Polarisationsfilter, dessen Durchlassachse um einen Winkel von 45° gegen die Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters gedreht ist. Geben Sie die Formel an, mit der man die Länge des erhaltenen Vektors berechnen kann!</p> <p>5. Welche Proportionalität besteht zwischen der Intensität des Lichts und dem elektrischen Feldvektor?</p> <p>6. Geben Sie die Formel an, mit der man die Intensität bestimmen kann, die durch den zweiten Polarisationsfilter hindurch kommt. (Malussches Gesetz)</p> <p>7. Auf einer optischen Bank sind eine Experimentierlampe und zwei Polarisationsfilter hintereinander angeordnet. Wann verhalten sich die Photonen beim Durchgang durch diese Anordnung alle gleich? Kreuzen Sie bitte an! Wenn, die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters parallel zur Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters ist. die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters um einen Winkel von 45° zur Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters verdreht ist. die Durchlassachse des zweiten Polarisationsfilters senkrecht zur Durchlassachse des ersten Polarisationsfilters ist.</p>	<p>8. In eine fünfstufigen Rankingskala werden folgende Aussagen bewertet: Mit einem Polarisationsfilter kann man Photonen in einen bestimmten Polarisationszustand bringen Photonen mit gleichem Polarisationszustand verhalten sich immer gleich Photonen haben immer einen Polarisationszustand Mit einem Polarisationsfilter kann man einen Polarisationszustand messen</p> <p>9. Geben Sie eine Reihenfolge von 1-8 der folgenden Aussagen an. 1 soll der Aussage zugeordnet werden, die am ehesten zutrifft. 8 ist die Aussage, die am wenigsten zutrifft. Physikalische Erkenntnisse werden gewonnen aus: Nr.:__ der Intuition eines Physikers Nr.:__ der theoretischen Widerlegung eines Experiments Nr.:__ logischen Überlegungen Nr.:__ der Durchführung eines Experiments Nr.:__ langen Versuchsreihen Nr.:__ mathematischen Herleitungen Nr.:__ der Durchführung von Gedankenexperimenten Nr.:__ der experimentellen Widerlegung eines Theoriegebildes</p> <p>10. Welche der folgenden Aussagen trifft für Sie zu? Kreuzen Sie bitte an! Wann ist eine physikalische Aussage allgemeingültig? (Vierstufiges Ranking für folgende Aussagen) wenn die Aussage aus einem allgemeinen Gesetz folgt, wenn die Aussage experimentell bestätigt ist, wenn Folgerungen aus der Aussage bestätigt sind, wenn die Aussage nicht widerlegt worden ist, wenn Folgerungen aus der Aussage nicht widerlegt wurden, wenn die Aussage das Ergebnis der methodisch einwandfreien Arbeit eines genialen Physikers ist, wenn der Aussage alle kompetenten Physiker zustimmen</p>
---	---