



Universität Hamburg

Department
Physik



Examensarbeit

Optik und Laserphysik: Eine Versuchsreihe für die Oberstufe

vorgelegt von:	Verena Rau
Fach:	Physik
Matrikelnummer:	5883907
Prüfer:	Prof. Dr. Klaus Sengstock
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Werner Neuhauser
Abgabetermin:	20.07.2010

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Versuchsskript für drei Experimente aus der Laserphysik erstellt. Sie sind wesentlicher Bestandteil von „Light and Schools“, einem Kooperationsprogramm zwischen dem Institut für Laserphysik und Schulen im In- und Umland von Hamburg. Es bietet den Schülern die Möglichkeit, Experimente der modernen Laserphysik durchzuführen und einen Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zu bekommen.

In der Arbeit wird zunächst darauf eingegangen, welche Ziele der Physikunterricht allgemein in der Schule verfolgt. Außerdem wird erklärt, dass es durchaus sinnvoll ist auch den Themenbereich Quantenphysik, der zum Teil als besonders unanschaulich empfunden wird, zu unterrichten, weil dieser die Grundlage der modernen Physik bildet. Ein Blick auf die Unterrichtsmethoden naturwissenschaftlichen Unterrichts verdeutlicht danach, dass außerschulisches Lernen sinnvoll ist somit und der „Lernort Labor“ für Schüler ermöglicht werden sollte.

Im Anschluss wird das Projekt „Light and Schools“ mit samt Zielen erläutert. Ein Einblick in die Evaluation des Pilotprojektes „Light and Schools“ aus dem Jahr 2009 zeigt die Notwendigkeit, das bereits bestehende Skript schülergerechter zu gestalten. Das neue Versuchsskript für die drei Versuche Festkörperlaser, Interferometer und akusto-optischer Modulator wird daher anschließend aufgeführt.

Den Schülern soll durch das Skript, das sie einige Wochen vorab erhalten, ermöglicht werden, die Versuche nachvollziehen zu können. Deshalb wurde in dem neu angefertigten Skript auf eine für Schüler angemessene Fachsprache und aussagekräftige Bilder geachtet. Dazu wurden Fotos von den Versuchsaufbauten gemacht, die diese verdeutlichen sollen. Zusätzliche Grafiken sollen das Verstehen der physikalischen Grundlagen unterstützen sollen. Ein kurzer motivierender Einführungstext vor jedem Versuch, soll die Schüler begeistern, diesen durchzuführen. Einige theoretische Inhalte des alten Skripts wurden dagegen entfernt, da sie für die Erklärung der Versuche nicht förderlich sind oder sogar die Schüler unnötig verwirren können. Die aufgeführten physikalischen Grundlagen werden sehr ausführlich erläutert und die Umformungen der dazugehörigen Formeln in für Schüler nachvollziehbaren Schritten durchgeführt. Zu jedem der drei enthaltenden Versuche sind konkrete Aufgaben erarbeitet worden, sodass den Schülern schon vor Beginn des Versuchstages deutlich ist, was sie im Praktikum erwartet.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Physik in der Schule	3
2.1	Zielsetzung des Physikunterrichts	3
2.2	Physik im Bildungsplan der gymnasiale Oberstufe	4
2.3	Moderne Teilgebiete in der Quantenphysik	5
2.4	Präkonzepte	6
2.5	Unterrichtsmethoden naturwissenschaftlichen Unterrichts	8
2.5.1	Konzepte	8
2.5.2	Experimente im Unterricht	10
2.6	Außerschulische Lernorte	12
3	Das Projekt „Light and Schools“	15
3.1	Das Projekt	15
3.2	Einblick in die Evaluation	16
4	Versuchsanleitung	17
4.1	Licht	17
4.1.1	Monochromatisches Licht	20
4.1.2	Kohärenz	20
4.1.3	Polarisation	23
4.2	Laser	24
4.2.1	Vom Bohrschen Atommodell zum Laser	24
4.2.2	Experimente zum Laser	32
4.3	Interferometer	35
4.3.1	Michelson - Interferometer	35
4.3.2	Experimente zum Michelson - Interferometer	37
4.3.3	Mach - Zehnder - Interferometer	38
4.3.4	Experiment zum Mach - Zehnder - Interferometer	43
4.4	Akusto-optischer Effekt	44
4.4.1	Der akusto-optische Effekt	45
4.4.2	Experimente zum akusto-optischen Effekt	52
4.5	Historische Anmerkungen	55
5	Fazit	57

1 Motivation

Physik ist in unserer Gesellschaft unter anderem grundlegend für die Forschung an Technologien zur Verbesserung des Energiehaushaltes, zum Schutz der Umwelt und zur Verbesserung des Komforts und der Lebensqualität der Bevölkerung. Die Begeisterung am Fach Physik ist allerdings gering, sodass viele Schüler¹ Physik in der Schule abwählen und dementsprechend noch weniger Abiturienten Physik studieren. Mit dem Mangel an Motivation gehen auch geringe Leistungen im Unterricht einher (vgl. (Oomen-Welke, 1988, S.85)).

Untersuchungen machen jedoch deutlich, dass bei den meisten Kindern ein Interesse an der Physik vorhanden ist, welches allerdings mit dem Physikunterricht in der Schule häufig verloren geht (vgl. (Renz, 2005, S. 3)). Dennoch empfindet ein Großteil der Schüler die Physik als wichtig für die Gesellschaft und erkennt die Notwendigkeit des Faches. Der eigene Physikunterricht dagegen wird oft als unwichtig empfunden. Viele bezeichnen ihn als lebensfremd und bemängeln, dass Themen, die sie interessieren könnten, nicht behandelt werden. Die davon abzuleitende mangelnde Motivation bedingt bei den meisten schlechte Lernerfolge und eine Überforderung durch Inhalte. Der Grund für das mangelnde Interesse einiger Schüler könnte somit im Schulunterricht selbst liegen. Durch den schlechten Lernerfolg in der Schule wiederum vergrößert sich die Wissenslücke zwischen Schule und Universität, wodurch noch mehr Schüler von der Wahl eines Physikstudiums abgeschreckt werden (vgl. (Lechte, 2008, S. 48)).

Hinzu kommt, dass einige Schüler den Physikunterricht abwählen, sobald dies möglich ist, um Weichen für ihren Beruf stellen. Viele Schüler können sich nicht vorstellen als Naturwissenschaftler zu arbeiten, weil sie glauben, dass Physik nur etwas für Experten ist, nichts aber für einen durchschnittlich Begabten. Zusätzlich prägen teilweise Medien ein negatives Bild vom Naturwissenschaftler, welches Jugendliche davon abschrecken könnte Physik zu studieren(vgl. (Höttecke, 2001, S. 8)).

Daher sollte es das Ziel sein, Schüler für physikalische Themen zu begeistern. Dazu gehört auch die Verbesserung der Vorstellungen der Schüler vom Bild eines Naturwissen-

¹In der gesamten Arbeit wird auf Grund der besseren Lesbarkeit nur die männliche Form verwendet. Gemeint sind stets beide Geschlechter.

schaftlers. Nur so kann ein Bild entstehen mit dem sie sich selbst identifizieren können und ein Interesse bekommen selbst Naturwissenschaftler zu werden. Insofern benötigt man eine bessere und modernere Darstellung der Naturwissenschaft „Physik“ in der Schule, um auch gerade diejenigen Schüler zu begeistern, die später nicht Physik studieren.

Durch eine größere Motivation kann oft mehr Leistung erzielt werden: Eine Untersuchung von Häußler ergab, dass die Leistungen von Schülern, sich längerfristig Inhalte zu merken, bei einer Experimentalgruppe deutlich höher waren als die Leistungen der Kontrollgruppe ohne Experimente (vgl. Häußler in (Lechte, 2008, S. 53)). Die Schüler entwickelten Selbstvertrauen, was zu mehr Interesse führte. Experimente können also Motivation stärken.

Solche Ergebnisse können motivieren weitere Projekte dieser Art zu initiieren. Eins dieser Projekte, welches sich „Light and Schools“ nennt, wurde vom Institut für Laserphysik ins Leben gerufen. Es soll den Schülern den Spaß am Experimentieren und Verstehen vermitteln und kann gleichzeitig das Bild vom modernen Physiker prägen. Das Projekt, welches sich hauptsächlich an Oberstufenschüler richtet, ist ein Praktikum mit drei Experimenten zur Laserphysik. An diesen können Schüler entweder Gelerntes überprüfen, Neues entdecken oder auch Bekanntes in Neuem wiedererkennen. Das Ende 2009 mit der Sophie-Barat Schule durchgeführte Pilotprojekt war ein erfolgreicher Auftakt für „Light and Schools“.

Im Anschluss an das Projekt wurde eine Evaluation durchgeführt. Die Ergebnisse waren größtenteils positiv, beschrieben das Projekt als sehr gelungen, zeigten aber auch Verbesserungswünsche auf. Aus der Evaluation geht vor allem hervor, dass das Skript als zu lang und zu kompliziert empfunden wurde (siehe Hellmig (2009)). Basierend auf diese Ergebnisse wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues für Schüler geeigneteres Skript erstellt. So kann das Projekt auf weitere Schulen ausgeweitet werden.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 wird beschrieben, welche Ziele der Physikunterricht in der Schule innehat und welche Rolle speziell das Thema Licht spielt. Ein Ausblick auf die verschiedenen Unterrichtsmethoden macht deutlich, wie wichtig Experimente für die Schüler sind, besonders, wenn diese außerschulisch angeboten werden. Kapitel 3 stellt kurz das Projekt „Light and Schools“ dar und gibt einen Einblick in die Evaluation. Anschließend folgt im Kapitel 4 das neue Versuchsskript, welches für die Schüler als Vorbereitung auf das Praktikum „Light and Schools“ dienen soll.

2 Physik in der Schule

2.1 Zielsetzung des Physikunterrichts

Für die Strukturierung des eigenen Unterrichts ist es wichtig zu wissen, welche Ziele man mit dem Unterricht verfolgt. In der heutigen Zeit werden die vier Bereiche Konzeptziele, Prozessziele soziale Ziele sowie Einstellungen und Werte als sinnvoll angesehen (vgl. (Kircher, 2007, S. 93-95)).

Als Konzeptziele bezeichnet man solche Ziele, bei denen es um das Wissen von Fakten, Begriffen und Theorien geht. Außerdem gehört das Verstehen von Zusammenhängen sowie eigenständiges Bilden von Hypothesen und Bewerten dazu. Diese klassischen inhaltlichen Ziele dominieren meist den Unterricht.

Die Prozessziele beinhalten physikalische und technische Fähigkeiten, die unterschiedlichen Anforderungen entsprechen. Dazu gehören die Fähigkeit zum Beobachten und Messen, das Erkennen von Aufgaben und das Suchen derer Lösungen. Außerdem sollen Daten interpretiert und Modelle aufgestellt werden können. Die neu gewonnenen Erkenntnisse sollen anschließend in den theoretischen Zusammenhang eingeordnet und reflektiert werden können. Schließlich ist noch das sachgerechte Bedienen von technischen Geräten ein Ziel, das für die Schüler auch außerhalb der Schule wichtig ist.

Auch soziale Ziele sind wesentlicher Bestandteil des Physikunterrichts. Die Schüler sollen zum Beispiel Rücksichtnahme auf Schwächere, Toleranz, Kompromissbereitschaft, Solidarität, Hilfsbereitschaft und Höflichkeit erlernen. Diese Ziele sind im Physikunterricht besonders gut zu verfolgen, da hier Gruppenunterricht möglich ist.

Zuletzt soll sich der Schüler auch Einstellungen und Werte zu eigen machen. Die meisten Werte erhält der Schüler aus anderen Lebensbereichen wie Familie und Freundeskreis, was häufig durch Nachahmung geschieht. Umso wichtiger ist es, dass dem Lehrer selbst bewusst ist, dass seine Überzeugungs- und Wertesysteme auch nachgeahmt werden (Vorbildfunktion). Erlern werden soll eine gewisse Selbstbestimmung, Mitbestimmung und Solidarisierung. Außerdem sollen sich die Schüler eine positive Haltung zur Technik aneignen und sich mit Umwelt und Energieproblemen auseinandersetzen. Nicht zu kurz

kommen darf, dass die Schüler ein Interesse oder Freude an der Physik selbst entwickeln. (vgl. (Kircher, 2007, S. 93-95))

Diese Ziele finden sich auch im Bildungsplan der gymnasialen Oberstufe wieder. Im folgenden Abschnitt wird deshalb dargestellt, welchen Auftrag die gymnasiale Oberstufe hat und welche Rolle dabei der Physikunterricht spielt. Diese Erkenntnisse beziehen sich auf den Bildungsplan Physik, der vom Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung erarbeitet wurde und seit August 2009 gilt.

2.2 Physik im Bildungsplan der gymnasiale Oberstufe

Grundsätzlich dient die gymnasiale Oberstufe dazu, den Schülern durch selbständiges Lernen, „[...] eine vertiefte allgemeine Bildung, ein breites Orientierungswissen sowie eine wissenschaftspropädeutische Grundbildung [...]“ (Zit. (Renz, 2009, S. 4)) zu vermitteln. Dies muss erwachsenengerecht geschehen, um Selbstverantwortlichkeit und Teamfähigkeit zu fördern.

Zur Zielerreichung trägt zum großen Teil auch das Fach Physik bei. Vor allem die vier oben genannten Konzeptziele und die dazugehörigen Kompetenzen wie Fachkenntnisse, Fachmethoden, Kommunikation und Bewertung werden durch den Physikunterricht gefördert. Um dies zu erreichen, muss der Unterricht so angelegt sein, dass die Schüler ein Verständnis für grundlegende physikalische Konzepte entwickeln können und lernen diese zu hinterfragen. Dabei werden die Grenzen des physikalischen Denkens aufgezeigt. Mit Hilfe von mathematischen Konzepten soll schließlich das logische Schlussfolgern möglich sein. Man möchte erreichen, dass Schüler offen für Kritik sind und Ergebnisse von Quellen hinterfragen.

Bei kompetenzorientiertem Unterricht stehen die Schüler im Mittelpunkt. Durch selbständiges Arbeiten, Problem- und Kontextorientierten Unterricht erlernen die Schüler diese Kompetenzen selbständig. Die Schüler werden dabei auch mit anspruchsvollen Texten konfrontiert. Beim selbständigen und kooperativem Arbeiten entwickeln sie ihre eigene Vorstellung über physikalische Konzepte (vgl. (Renz, 2009, S. 14)).

Durch den Physikunterricht soll außerdem der Zusammenhang zwischen physikalischen Erkenntnissen und der gesellschaftlichen Entwicklung deutlich gemacht werden. Hier-

bei soll der Physikunterricht den Schülern auch helfen, mit der technischen Entwicklung Schritt zu halten, und den Umgang mit Geräten zu erleichtern.

Der Einbezug von verschiedenen Betrieben und Forschungsstätten zum Beispiel in Form eines Praktikums kann den Anschluss an eine nachfolgende Ausbildung oder ein nachfolgendes Studium erleichtern, vor allem aber kann es auch Interesse an der Physik wecken.

Das Kennen von Konzepten der Physik, der Umgang mit technischen Geräten sowie Erfahrungen aus Betrieben und Forschungsstätten fördern sowohl abstraktes Denken, Aufstellen von Hypothesen und die Kritikoffenheit als Basis zum Argumentieren und Diskutieren. Dies ist für eine Vielzahl von folgenden Studiengängen von Nöten (vgl. (Renz, 2009, S. 10)).

Zur Erreichung der Konzeptziele müssen physikalische Inhalte vermittelt werden. In der Oberstufe sollen vier Verbindliche unterrichtet werden: Feldkonzept, Wellenkonzept, Teilchenkonzept und Quantenkonzept. Dabei stellt das Quantenkonzept eine besondere Herausforderung dar, weil die bisher behandelten klassischen Konzepte an eine Grenze gelangen. Physikalische Probleme lassen sich mit Hilfe der klassischen Physik nicht ohne weiteres erklären und bedürfen einer neuen Theorie. Es soll deutlich werden, dass Licht nicht nur Welle, aber auch nicht nur Teilchen ist. Die Schüler sollen vier wesentliche Merkmale in diesem Quantenkonzept erlernen: Die Quantelung, stochastisches Verhalten, Unbestimmtheit und Komplementarität (vgl. (Renz, 2009, S. 16)).

2.3 **Moderne Teilgebiete in der Quantenphysik**

Quantenphysik ist für die Schule besonders interessant, weil sie seit ihrer Entdeckung die Grundlage der modernen Physik darstellt und sie das physikalische Weltbild grundlegend verändert hat. Da die Quantenphysik die Grundlage zahlreicher Technologien wie Laser, Transistor und Leuchtdiode ist, ist es sinnvoll, dass auch dieser Teil im Lehrplan steht. Dies wird häufig diskutiert, weil die Quantenphysik als sehr unanschaulich empfunden wird und Ergebnisse aus Versuchen meist nicht mit klassischen Vorstellungen erklärt werden können. Folgende Bereiche sind nach Kircher in der Quantenphysik wichtig für den Physikunterricht, sodass sie im Bildungsplan auftauchen (vgl. (Kircher, 2007, S. 432-436)).

In der Quantenphysik gibt es viele Phänomene, die nur durch gequantelte Größen erklärt werden können. Dies ist aus der klassischen Physik nicht bekannt, Größen können alle beliebigen Werte annehmen und ergeben ein kontinuierliches Spektrum. Dass Ladungen und Energien gequantelt vorliegen, kann durch verschiedene Experimente wie zum Beispiel dem Milikan - Versuch oder dem Photoeffekt verdeutlicht werden. Auch zur Erklärung von Absorption und Emission ist die Quantelung von Licht wesentlich.

Auch die in der Quantenphysik stochastische Beschreibung von Größen ist in der klassischen Physik unüblich. Den Schülern ist eine stochastische Beschreibung zum Beispiel vom Würfel bekannt, von der Beschreibung eines Teilchen allerdings nicht. Der Ort und Impuls von Elektronen sind stochastisch verteilte Größen, die nicht exakt angegeben werden können. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation ist bei bekannten Impuls der Ort unscharf und bei bekannten Ort der Impuls. Die stochastische Beschreibung wird auch bei angeregten Atomen deutlich, denn sie emittieren ein Photon mit einer gewissen Halbwertszeit.

Das Phänomen Interferenzen ist den Schülern durch Wellenlehre schon bekannt. Sie können durch Spaltexperimente und Interferometer nachgewiesen werden. In der Quantenphysik kommt allerdings dazu, dass auch einzelne Quanten also Teilchen mit sich selbst interferieren können. Dies wird deutlich, wenn man einzelne Photonen auf einen Spalt schickt und nach einer Weile das Interferenzbild hinter dem Spalt betrachtet.

Genauso ist die Komplementarität ein Phänomen der Quantenphysik. Weiß man bei einem Doppelspaltexperiment, durch welche Öffnung das Photon kommt, gibt es keine Interferenz mehr. Wenn andersrum ein Interferenzbild hinter dem Doppelspalt zu sehen ist, weiß man nicht durch welchen Spalt das Photon gelangt ist.

Bei diesen aus der klassischen Physik unbekannt Phänomenen werden von den Schüler oft Vorstellungen aus der klassischen Physik verwendet. Dadurch entstehen Präkonzepte, die nach aktuellem Wissenstand meist falsch sind. Einige dieser Präkonzepte werden im folgenden Abschnitt aufgeführt.

2.4 Präkonzepte

Vor dem Physikunterricht haben die Schüler vielfältige Alltagsvorstellungen zu Phänomenen und Begriffen, die durch Medien und durch das soziale Umfeld stark geprägt

sind. Diese sogenannten Präkonzepte stimmen oft nicht mit den zu lernenden wissenschaftlichen Vorstellungen überein und stellen eine Ursache für Lernschwierigkeiten der Schüler dar. Um Schüler von anderen Vorstellungen überzeugen zu können, müssen diese die Möglichkeit haben, auf vorhandene Vorstellungen aufzubauen oder diese korrigieren zu können. Ihnen muss gezeigt werden, dass die neuen Vorstellungen sinnvoll sind und helfen, Phänomene zu beschreiben (vgl. Kircher, 2007, S. 581)).

Die Präkonzepte in der Quantenphysik sind von der klassischen Physik beeinflusst, da im Alltag der Schüler nur die klassischen Phänomene auftreten. Dennoch haben einige Schüler auch vor dem Thema Quantenphysik in der Schule die Vorstellung, dass zum Beispiel Licht aus Teilchen besteht. Die Untersuchung von Lichtfeld und Fischer ergab, dass 43% der Schüler aus Grund- und Leistungskursen sich Licht als Welle vorstellen, 7,3% glauben, dass Licht aus Teilchen besteht und 40% haben eine dualistische Vorstellung. Ein Atom stellen sie sich meist nach dem Bohrschen Atommodell vor, wobei die Elektronen durch die Coulomb- und durch die Zentrifugalkraft auf den Bahnen gehalten werden. Weitere Gedanken zu den aufgestellten Postulaten von Bohr werden häufig nicht gemacht. Da dieses Modell an das Planetenmodell erinnert, stellen sich die Schüler Elektronen als kleine Kügelchen vor. (vgl. Lichtfeld und Fischer in (Müller, 2003, S. 26)).

Da weder das Teilchenmodell noch das Wellenmodell für sich allein ausreicht, wird meist ein dualistisches Bild von Quantenobjekten im Unterricht vorgestellt. Je nach Experiment benutzt man entweder das Teilchen-, z.B. beim Photoeffekt, oder aber das Wellenmodell, z.B. beim Doppelspaltexperiment. In der Schule sind das zwei nebeneinanderstehende Vorstellungen. Die Verknüpfung dieser beiden Konzepte ist in der Schule schwierig, weil die Formalismen der Quantenphysik noch nicht zur Verfügung stehen.

Manchmal wird auch nach der Kopenhagener Interpretation unterrichtet. Als Alternative zu den Modellen, die an bestimmten Punkten an Grenzen stoßen, werden in dieser Interpretation keine Vorstellungen über die Quantenobjekte gemacht. Es wird nur über die Ergebnisse von Experimenten gesprochen. Das heißt nur die Registrierung von den Quantenobjekten und die Emission von diesen wird betrachtet. Was zwischen den beiden Ereignissen geschieht, wird vernachlässigt. Man spricht von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Quantenobjekte. Diese Interpretation ist allerdings in der Schule schwierig zu nutzen, da die Schüler eine Vorstellung von den Objekten brauchen und sich dann insgeheim die dualistische Vorstellung zu eigen machen (vgl. Kircher, 2007, S. 437-442)).

2.5 Unterrichtsmethoden naturwissenschaftlichen Unterrichts

Im folgenden werden zunächst die vier Konzepte vorgestellt, die in der Physikdidaktik eine wichtige Rolle spielen. Im Anschluss wird auf Experimente im Rahmen des Physikunterrichts noch einmal gesondert eingegangen.

2.5.1 Konzepte

Physikdidaktische Unterrichtskonzepte geben Prinzipien vor, wie unterrichtet werden sollte. Um sich für eine Form der Wissensvermittlung zu entscheiden, sind die gewünschten Ziele für die jeweilige Unterrichtssequenz wichtig.

Im folgenden werden die vier physikdidaktischen Unterrichtskonzepte vorgestellt. Jedes dieser Konzepte hat, je nachdem welches Ziel verfolgt wird, seine Berechtigung. Es ist nicht immer möglich die verschiedenen Konzepte zu trennen, da Überschneidungen möglich sind (vgl. (Kircher, 2007, S. 155-162)).

Nach Mach muss aufgrund des immer weiter steigenden Wissensbestandes ein **exemplarischer Unterricht** durchgeführt werden. Das heißt an didaktisch relevanten Beispielen sollen die wesentlichen Merkmale der Physik dargestellt werden. Deutlich werden sollen vor allem die Bedeutung von Messungen, Messgenauigkeiten und Experimenten, typischen physikalischen Strukturen, Arbeitsweisen und Erkenntnismethoden. Die gewonnen Erkenntnisse sollen auf andere Beispiele übertragen werden können. Ziel dieser Unterrichtsmethode ist nicht nur die Darstellung einzelner Sachverhalte, sondern vor allem die Darstellung von Gemeinsamkeiten und Zusammenhängen verschiedener Phänomene.

Das Auswählen einzelner Beispiele hat den Vorteil, im Unterricht mehr Zeit zur Vertiefung und Erarbeitung des Phänomens zur Verfügung zu haben und die Verstrickung zwischen den Beispielen deutlich zu machen. Dadurch kann im Endeffekt ein authentisches Bild der Wissenschaft erzeugt werden. (vgl. Mach in (Kircher, 2007, S. 155-162)).

Beim **genetischen Unterricht** wird darauf geachtet, wie man zu einer bestimmten Erkenntnis kommt. Nach Köhnlein unterscheidet man zwischen individual-genetischem, logisch-genetischem und historisch-genetischem Aspekt. Beim individual-genetischen Aspekt bezieht man sich auf die Vorerfahrungen und das Vorwissen einzelner Schüler und bietet

damit die Möglichkeit, die Kenntnisse und Fähigkeiten weiter zu entwickeln. Dagegen sollen beim logisch-genetischen Aspekt besonders die inneren Strukturen des zu untersuchenden Gegenstandes nachvollzogen werden können. Der historisch-genetische Aspekt soll den Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Geschichte der Wissenschaft verdeutlichen.

Besonders schülerorientiert ist der individual-genetische Unterricht, bei dem an die Alltagsvorstellungen der Schüler angeknüpft wird, sodass der Übergang von vorwissenschaftlichen Erfahrungen zu wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnissen bruchlos geschehen kann. Im Lehrer-Schüler-Gespräch kann der Schüler dort „abgeholt“ werden, wo er steht. Dabei stellt der Lehrer nur einen Moderator und keinen Dozenten dar. Das Vorverständnis und Weltbild der Schüler soll weiterentwickelt und manchmal geändert werden. Die Initiative liegt beim Schüler, da dieser seine Vorstellungen über den jeweiligen Gegenstand darstellen soll. Dadurch hat er die Chance, den Sachverhalt richtig zu verstehen und nicht nur Begriffe auswendig zu lernen.

Der Schüler lernt produktiv nach unbekanntem Aspekten zu suchen, Ergebnisse zu finden und diese kritisch zu hinterfragen, wodurch er ein authentisches Bild von der Wissenschaft erhält. Dadurch, dass er selbst darstellen kann, was er schon weiß, bleibt die angeborene Lernlust des Schülers erhalten und er ist mit mehr Interesse beim Unterricht dabei. (vgl. Köhnlein in (Kircher, 2007, S. 155-162))

Beim **entdeckenden Unterricht** haben die Schüler selbst die Chance durch zum Beispiel Experimentieren subjektiv Neues zu erlernen. Das kann einerseits als gelenkte Entdeckung passieren, in dem der Lehrer einige Hilfen bietet andererseits auch als forschender Unterricht, wobei die Schüler auf sich selbst gestellt sind.

Ziel ist es, die Neugier der Schüler zu befriedigen und methodische Fähigkeiten sowie genaues Beobachten und Experimentieren (Prozessziele) zu erlernen, welche notwendige Voraussetzung sind, um vielfältige Probleme zu lösen. Außerdem werden soziale Ziele erreicht, der Schüler lernt mit anderen zusammen zu arbeiten, ist flexibel und kann ausdauernd an der Lösung von Problemen arbeiten. Durch das Experimentieren erfreut sich der Schüler an der Physik und entwickelt Interesse daran. Erfolgreiches Experimentieren verstärkt das Selbstbewusstsein der Schüler. Durch die intrinsische Motivation, die durch Experimentieren erreicht werden soll, kann erlerntes längerfristig behalten werden.

Die Vielfältigkeit der Ziele, die durch entdeckenden Unterricht zu erreichen sind, machen diese Art von Unterricht unverzichtbar, auch wenn man in Kauf nehmen muss, dass Schüler Begriffe teilweise nur oberflächlich kennenlernen.

Im Gegensatz zum entdeckendem Unterricht steht der **darbietende Unterricht**, bei dem der Lehrer durch Lehrervorträge und Demonstrationsexperimente den Wissenserwerb der Schüler bewirkt. Schüler sind passiv und nur manchmal bei den Demonstrationsexperimenten als Assistent aktiv dabei. Nach Asubel sollte der Frontalunterricht nicht vollständig durch entdeckenden Unterricht ersetzt werden, da darbietender Unterricht deutlich effektiver ist. Auch hier kann an Vorwissen der Schüler angeknüpft werden, sodass die Schüler den Beispielen eine Bedeutung zuschreiben.

Beim darbietendem Unterricht stehen die Konzeptziele im Vordergrund, begriffliche Strukturen können in kurzer Zeit verdeutlicht werden und die fachliche Kompetenz der Schüler wird gefördert. (vgl. Asubel in (Kircher, 2007, S. 155-162))

2.5.2 Experimente im Unterricht

Da Experimente wesentlich für die Physik eine wesentliche Rolle spielen, wird hier noch einmal ausführlicher geschildert, was ein Experiment ist und welche Funktionen es in der Schule hat.

Was ist ein Experiment?

In der Forschung ist ein Experiment ein wiederholbares und objektives Verfahren, um in der physikalischen Forschung Erkenntnisse zu gewinnen (vgl. (Kircher, 2007, 230-244)). Dabei hat es festgelegte und kontrollierbare Rahmenbedingungen und sowie bestimmte Variablen, die systematisch verändert werden können. Ein Experiment muss also ausgiebig geplant werden. Die Datenaufnahme beim Experiment muss so präzise wie möglich sein. Nach der Durchführung des Experiments müssen die Ergebnisse analysiert werden und vor dem theoretischen Hintergrund interpretiert werden. Es können während des Experimentes nicht selten unvorhergesehene Einflüsse auftreten, die das Experiment beeinflussen. Ein einzelnes Experiment kann dementsprechend nicht als Kriterium der Wahrheit herangezogen werden.

Häufig wird in der Schule für Experiment auch der Begriff Versuch benutzt, der aber nur im allgemeinen Sprachgebrauch das Gleiche meint. Als Versuch bezeichnet man in der Fachsprache alle Lehr- und Lernaktivitäten, bei denen zum Beispiel Schüler etwas beobachten oder beeinflussen können. Experimente dagegen sind eine besondere Form der Versuche. Sie dienen zur Überprüfung von Hypothesen und Argumenten (vgl. (Mikelskis, 2006, S. 149 ff.)).

In der Schule ist das Experiment ein gebräuchliches Mittel, um die Schüler an bereits gesicherte Erkenntnisse heranzuführen und dient meist nur zur Veranschaulichung. Im Unterricht wird dann induktiv aus den experimentellen Ergebnissen zu allgemeinen Gesetzen gefolgert. Außerdem bestätigen bzw. widerlegen die Experimente aufgestellte Theorien. Das sind Methoden, die so in der Forschung nicht gebräuchlich sind, weswegen der Begriff Versuch hier besser passt.

Ich werde im folgenden Versuch und Experiment in der Schule als Synonym verwenden.

Didaktische Funktionen des Experiments in der Schule

Das Experiment ist in der Schule so wichtig, weil es mehrere Funktionen inne hat. Zuerst ist die pädagogische Funktion zu nennen. Die Schüler lernen zu beobachten und ihre Beobachtungen kritisch zu hinterfragen und erlangen dadurch Objektivität und lernen geduldig zu sein.

Dann hat das Experiment eine psychologische Funktion. Das Experiment motiviert die Schüler und dadurch entwickeln die Schüler eigene Vorstellungen und Lösungsverfahren. Hierdurch wird die Lernleistung maßgeblich beeinflusst.

Dann hat das Experiment in der Schule auch eine wissenschafts- und erkenntnistheoretische Funktion. Durch qualitative Experimente können Naturphänomene demonstriert werden. Quantitative Experimente dienen dagegen zur Prüfung theoretischer Theorien. Dadurch wird der Bezug zur Wissenschaft aufgebaut. Allerdings können Experimente in der Schule den wirklichen Wissenschaftscharakter nicht widerspiegeln, da nur schon Bekanntes durch die Experimente verdeutlicht wird.

Zuletzt hat der Versuch auch eine fachliche Funktion indem zur Bildung von Begriffen, Entwicklung von Theorien und Prinzipien dient. Das kann durch Erforschen von etwas

Neuem, überprüfen von Theorien oder Festigung von Bekanntem geschehen (vgl. (Mikelskis, 2006, S. 149- 154).

2.6 Außerschulische Lernorte

Außerschulische Lernorte bieten den Schülern die Möglichkeit, in einer authentischen Umgebung selbständig praktische Erfahrungen zu sammeln. Besonders authentisch ist die Umgebung dann, wenn Apparaturen aus der aktuellen Forschung genutzt oder Laborbesichtigungen durchgeführt werden. So sollen die Schüler die Bedeutung der Naturwissenschaft und Technik für die Gesellschaft selbst erfahren. Die Schüler werden mit Wissenschaftlern zusammengeführt und können sich ein reelles Bild vom Naturwissenschaftler machen. Ferner lernen die Schüler im Lernort Labor, wie Mikelski außerschulische Lernorte nennt, dass naturwissenschaftliche Forschung vor allem von der Kreativität, dem Engagement und dem Interesse der Wissenschaftler abhängt (vgl. (Mikelskis, 2006, S. 167)). Somit schafft der Lernort Labor die Gelegenheit Tätigkeitsfelder und Berufsbilder der Naturwissenschaftler kennen zu lernen. Außerschulische Lernorte sollen vor allem aber das Interesse an der Naturwissenschaft in den Schülern wecken und den Schüler aufgeschlossener für Naturwissenschaft und Technik machen (vgl. (Hillebrand, 2005, S. 20)).

Um außerschulische Lernorte besonders effektiv zu gestalten, ist eine Verknüpfung mit dem Bildungsplan sinnvoll. Überdies sollte eine Vorbereitung im Unterricht stattfinden, sodass sich die Schüler im Praktikum inhaltlich orientieren können. Besonders wichtig für die Schüler ist, dass sie im Vergleich zur Schule genügend Zeit haben, sich auf die Versuche einzulassen. Eine gewisse Wahlmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Experimenten bietet den Schülern die Möglichkeit nach Interesse zu forschen. Schülerlabore können somit das Interesse an Physik deutlich steigern (vgl. Höttecke (2007)).

Außerschulische Lernorte sollen aber keineswegs die Schulphysik ersetzen, sondern dienen als Ergänzung und Motivation für die Schüler.

In Deutschland gibt es eine Vielzahl von Initiativen¹, die Labore als Lernorte anbieten. Eine Vielzahl von Evaluationen bestätigen, dass außerschulische Lernorte das Interesse und die Motivation an der Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Problemen verstärken. Dadurch wird gleichzeitig eine Akzeptanz des Unterrichts geschaffen

¹Viele dieser Schülerlabore sind auf folgender Seite zu finden: www.lernort-labor.de.

und die Einstellung gegenüber der Physik verbessert. Dabei ist der Wissenserwerb durch den Lernort Labor deutlich höher als in der Schule, was sich dann positiv auf die schulischen Leistungen auswirkt. Die Schüler sind infolge dessen in der Lage, ihre eigenen Fähigkeiten besser einzuschätzen, und entwickeln ein Selbstvertrauen im Bezug auf die Bearbeitung von Problemen. Es stellt sich heraus, dass durch den „Lernaort Labor“ heterogene Lerngruppen ausgeglichener und Mädchen und Jungen gleichermaßen angesprochen werden. Die Erfahrungen im „Lernort Labor“ helfen den Schülern bei ihrer Studien- und Berufswahl und überzeugen häufig zu einem naturwissenschaftlichen Studium (vgl. (Haupt, 2008),(Dähnhardt, 2005)).

3 Das Projekt „Light and Schools“

3.1 Das Projekt

Das Projekt „Light and Schools“ ist entstanden aus einer Zusammenarbeit der Sophie - Barat Schule und dem Institut für Laserphysik, eingebunden in den Landesexzellenzcluster „Frontiers in Quantum Photon Science“. Es dient zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Dabei soll speziell das Interesse und die Akzeptanz an naturwissenschaftlichen Fächern durch Faszination für Themen aus dem Bereich der Laserphysik geweckt werden und die gesellschaftliche Relevanz der Forschung mit Licht für die Schüler erfahrbar gemacht werden. Außerdem soll allgemein ein Einblick in die Forschung und in die wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen ermöglicht werden.

Das Pilotprojekt mit der Profiloberstufe der Sophie - Barat Schule wurde Ende 2009 durchgeführt. Eingeführt wurde das Projekt durch einen Vortrag, der die Schüler in die Thematik einstimmen sollte. In den Versuchstagen wurden drei Experimente in einem Labor des Instituts für Laserphysik angeboten. Untersucht wurden die Interferenzeigenschaften von Laserlicht mit Hilfe von dem Mach - Zehnder Interferometer und dem Michelson Interferometer und die Streuung von Laserlicht an akustischen Wellen. Außerdem konnte ein Festkörperlaser durch Justage von Spiegeln aufgebaut werden. Die Besichtigung von echten Forschungslaboren konnte dann einen Einblick in die aktuelle Forschung bieten.

Um das Projekt zu optimieren und auf weitere Schulen auszuweiten, gibt es seit April 2010 einen Koordinator¹. Dieser erstellt für jede Schule individuell ein passendes Programm und erarbeitet ein neues auch für die Mittelstufe geeignetes Projekt.

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Projekt „Light and Schools“ weiterentwickelt und ein neues grundlegend überarbeitetes Versuchskript erstellt. Zu den bisherigen drei Experimenten wird ein viertes dazukommen, welches die Interferenz einzelner Photonen am Doppelspalt verdeutlichen soll.

¹Dr. Thomas Garl, „Light and Schools“ Koordinator

3.2 Einblick in die Evaluation

Zu dem im November 2009 gestarteten Pilotprojekt „Light and Schools“ wurde eine Evaluation durchgeführt. Diese sollte überprüfen, wie der Vortrag, das Skript, die einzelnen Versuche, die Betreuung durch die Assistenten und die Arbeitsatmosphäre auf die Schüler gewirkt haben. Interessant für vorliegende Arbeit ist vor allem die Bewertung des Skriptes, der Versuche und der Arbeitsatmosphäre.

Auf den anonymen Fragebögen wurde von mehr als der Hälfte der Schüler angegeben, dass das Skript von ihnen gelesen wurde, ein weiterer großer Teil der Schülerschaft gab an, dass es zumindest zum Teil von ihnen gelesen wurde. Eine mündliche Überprüfung ergab allerdings später, dass viele Schüler das Skript nicht gelesen hatten (vermutlich aufgrund sozialer Erwünschtheit). Wie aussagekräftig das Ergebnis der Evaluation diesbezüglich dann ist, ist fraglich.

Nach Angaben der Schüler ist der Stoffumfang, die Verständlichkeit und der Nutzen des Skriptes mittelmäßig. Auch wenn die Schüler das Skript tatsächlich nicht gelesen haben, kann dies auf den Umfang und die Verständlichkeit des Skriptes zurückzuführen sein.

Die Versuche waren laut Evaluation für die meisten Schüler sehr interessant und haben Interesse am Fach Physik geweckt. Auch bei der Komplexität und dem Lernerfolg ist meist angegeben worden, dass dies im guten Bereich liegt, nur vereinzelt sind negative Bewertungen aufgetreten.

Die Arbeitsatmosphäre wurde durchweg als sehr angenehm empfunden und die meisten Schüler würden ein solches Projekt noch einmal mitmachen. Auch die Organisation des Praktikums wurde als sehr geeignet angegeben. Was die Schüler allerdings bemängelten, war, dass sowohl die Vorbereitungs- als auch die Nachbereitungszeit in der Schule zu kurz war. Dies ist leider auf den straffen Lehrplan zurückzuführen und nicht durch eine Überarbeitung dieses Projektes zu verändern.

Insgesamt kann man jedoch sagen, dass die Schüler und Lehrer sich für diese Art von Projekt begeistern konnten. Infolge dessen ergibt es Sinn, Projekte in dieser Form weiter anzubieten und so durchzuführen. Eine Überarbeitung des Skriptes und der Versuche sowie das Hinzufügen motivierender Einführungstexte für die einzelnen Versuche könnte das Projekt weiter abrunden. Das neu erarbeitete Skript wird im folgenden Teil der Arbeit vorgestellt.

4 Versuchsanleitung

4.1 Licht



Ob Sonne, Regenbogen, Kerzen, Schatten, Farben, Spiegel, Ampeln, Taschenlampen, Laser oder Handydisplays, das Phänomen Licht ist überall in der Natur und im täglichen Leben zu beobachten. Dennoch ist es schwierig, den Begriff Licht zu definieren.

Optische Technologien sind Schlüsseltechnologien der heutigen Gesellschaft. Sowohl Kommunikation, Medizin, Messtechnik, Solarenergie und Astrophysik nutzen Licht. Somit ist Licht Forschungsgegenstand bis heute.

In der Optik werden Phänomene des Lichtes durch unterschiedliche Modelle beschrieben. Welches Modell verwendet wird, hängt von unterschiedlichen Aspekten ab. Bis 1900 wurden das Lichtstrahlenmodell und das Wellenmodell genutzt.

Geometrische Optik kann mit Hilfe des Lichtstrahlenmodells beschrieben werden. Phänomene wie Reflektion und Brechung lassen sich damit erklären (vgl. (Diehl, 2008, S. 264)). Beugungserscheinungen können durch das Wellenmodell beschrieben werden.

Beide Modelle lassen sich in Einklang bringen. Wenn Licht eingengt wird und der Durchmesser d des entstandenen Bündels viel größer ist als die Wellenlänge λ des Lichtes, weist das Bündel kaum Aufweitung durch Beugung auf. Das Strahlenbündel wird

als Lichtstrahl betrachtet. Erst wenn der Durchmesser d des Lichtbündels in der Größenordnung der Wellenlänge ist, tritt die Beugungserscheinung deutlich hervor (siehe Abb.: 4.1).

Die Strahlenoptik ist somit nur in dem Bereich gültig, bei dem die Lichtbündel breiter sind als die Wellenlänge (vgl.(Grehn, 2007, S. 319)).

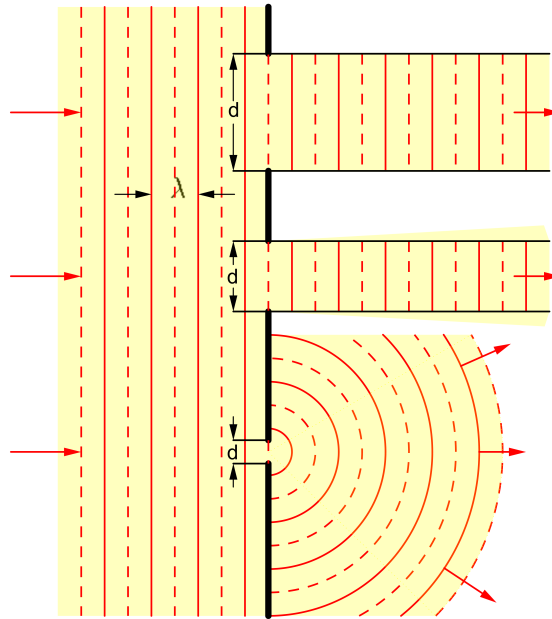


Abbildung 4.1: Vereinigung des Strahlenmodells mit dem Wellenmodell.

Bei der Beleuchtung eines Prismas stellt sich heraus, dass weißes Licht in farbige Bestandteile aufgespalten wird und ein Spektrum von rot über gelb und grün bis blau entsteht. Die Aufspaltung erfolgt, da die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium von der Farbe des Lichtes abhängt. Licht hat in Vakuum die Lichtgeschwindigkeit:

$$c = 2,9979245 \cdot 10^8 \frac{m}{s},$$

und in Medien eine geringere vom Brechungsindex abhängige Geschwindigkeit. Somit werden die einzelnen Bestandteile des Lichtes auf unterschiedliche Weise gebrochen. Das Spektrum des weißen Lichtes besteht aus allen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums, also von 380 nm bis 780 nm (siehe Abb.: 4.2). An das sichtbare Spektrum grenzt mit kürzerer Wellenlänge der Ultraviolett - Bereich und mit längerer Wellenlänge der Infrarot - Bereich. Wenn Licht durch einen schmalen Spalt tritt, weicht es von der geradlinigen

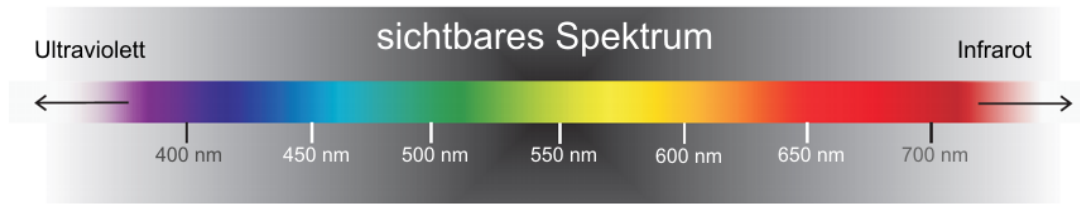


Abbildung 4.2: Spektrum des sichtbaren Bereiches elektromagnetischer Strahlung.

Ausbreitung ab, es wird gebeugt. Dies lässt sich nur durch das Wellenmodell erklären. Die Beschreibung einer Welle erfolgt über die Auslenkung, Amplitude, Schwingungsdauer und Wellenlänge. Die Frequenz, die Wellenlänge und die Lichtgeschwindigkeit hängen auf folgende Weise zusammen(vgl. (Diehl, 2008, S. 268)):

$$c = \frac{\lambda}{f}$$

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die keinen Träger zur Ausbreitung benötigt und Welleneigenschaften wie Reflektion, Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation aufweist (vgl.(Grehn, 2007, S. 322)).

Um Eigenschaften des Lichtes erklären zu können, eignet sich das Wellenmodell nicht immer. Ein Experiment, das als Photoeffekt bekannt wurde, zeigt, dass Licht in bestimmten Energieportionen

$$E = h \cdot f \quad \text{mit } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (4.1)$$

den sogenannten Lichtquanten oder auch Photonen vorliegen muss(vgl. (Diehl, 2008, S. 281)). Licht, welches auf eine Metalloberfläche trifft, kann Elektronen herauslösen. Dabei hängt es nicht von der Intensität des Lichtes ab, sondern von der Frequenz, ob Elektronen herausgelöst werden. Das verdeutlicht, dass die Energie nicht kontinuierlich verteilt sein kann, sondern in Energieportionen abhängig von der Frequenz (vgl. Gl.4.1 auftreten muss.

Licht muss also sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften besitzen. Insofern sind die beiden Modelle, das Wellenmodell und das Teilchenmodell, für die Erklärung vieler Phänomene nötig.

Die weiter unten folgenden Versuche sollen einige Phänomene des Lichtes aufklären. Für jeden der Versuche wird Laserlicht wegen seiner besonderen Eigenschaften verwendet. Diese besonderen Eigenschaften werden zunächst vorgestellt.

4.1.1 Monochromatisches Licht

Weißes Licht besteht aus dem gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes, einfarbiges nur aus einem bestimmten Bereich des Spektrums. Perfekt monochromatisches (griechisch: mono-chromos: eine Farbe) Licht besteht nur aus einer Wellenlänge. Dieses Ideal kann allerdings nicht realisiert werden, man beobachtet eine Frequenzverteilung, wie sie in Abb. 4.3 zu sehen ist. Hier ist die Linie, die sehr schmal ist, eines Helium - Neon Lasers zu sehen. Die Frequenz des Lasers liegt bei $474 \cdot 10^{12}$ Hz wogegen die Frequenzbreite bei $1,5 \cdot 10^9$ Hz liegt, was 5 Größenordnungen kleiner ist ((Kneubühl, 2008, S. 66)). Zur Bestimmung der Frequenzbreite Δf muss zunächst definiert werden, wo gemessen wird. Hier wird als Linienbreite die Halbwertsbreite genutzt. Das heißt an den Stellen, bei denen die Intensität halb so groß ist wie die maximale Intensität, wird die Frequenzdifferenz gemessen.

Auch bei der Emission oder Absorption von elektromagnetischer Strahlung in Atomen, die durch den Übergang von Elektronen zwischen unterschiedlichen Energiebahnen entsteht, ist das Licht trotz der diskreten Energiewerte nicht streng monochromatisch. Verschiedene Effekte beeinflussen die Energie und somit auch die Wellenlänge des abgegebenen Lichtes (vgl. (Demtröder, 2007, S. 41 f.)).

Im allgemeinen bezeichnet man Licht, das nur aus einem schmalen Wellenlängenbereich bzw. Frequenzbereich besteht, als monochromatisch. Zu den monochromatischen Lichtquellen gehören die Laser, welche eine geringe Linienhalbwertsbreite von 1 kHz haben können. Gegenbeispiele sind u.a. Sonnenlicht, Kerzenlicht und Zimmerbeleuchtung, da eine Vielzahl von Wellenlängen enthalten sind (vgl.(Grehn, 2007, S. 325)).

4.1.2 Kohärenz

Licht ist genau dann kohärent, wenn die Welle einen definierten Phasen- oder Gangunterschied aufweist. Man unterscheidet zwischen zeitlicher und räumlicher Kohärenz.

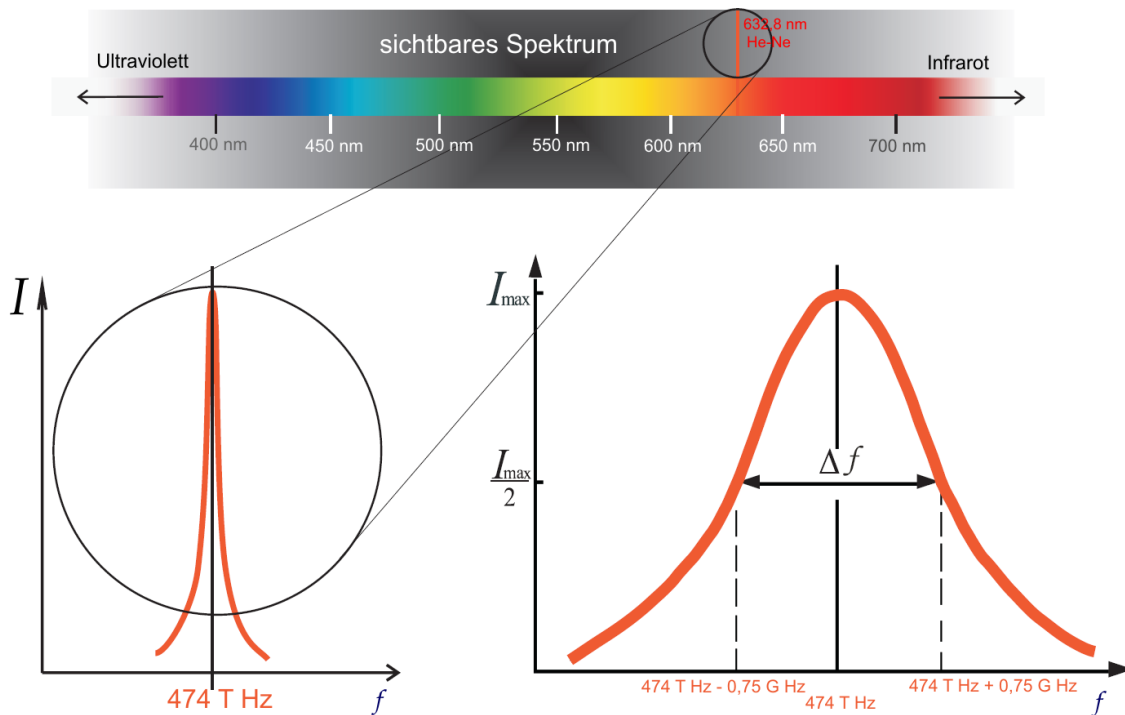


Abbildung 4.3: Frequenzverteilung des Helium - Neon Lasers mit der Halbwertsbreite als Linienbreite.

Eine Welle ist perfekt zeitlich kohärent, wenn zwischen zwei Punkten in Ausbreitungsrichtung zu allen Zeiten die gleiche Phasenbeziehung herrscht. Wenn diese feste Phasenbeziehung nur für einen Zeitraum vorliegt, spricht man von teilweiser Kohärenz.

Perfekte räumliche Kohärenz liegt vor, wenn zu beliebigen Zeiten die gleiche Phasenverschiebung zwischen zwei Punkten quer zur Ausbreitungsrichtung vorliegt. Bei zwei Punkten auf einer Wellenfront ist die Phasenverschiebung gleich null. Wenn die feste Phasenverschiebung nur für einen Bereich gilt, dann ist die Welle teilweise räumlich kohärent (vgl. (Graf, 2009, S. 15 f.)).

In Abbildung 4.4 sind zeitliche und räumliche Kohärenz zu sehen.

Damit Licht perfekt kohärent ist, muss es streng monochromatisch sein. Sonnenlicht, Kerzenlicht und Raumlicht besteht aus einer Vielzahl von Wellenlängen und ist damit nicht kohärent.

Laserlicht, welches eine schmale Frequenzbreite besitzt, ist teilweise kohärent. Die kaum verschiedenen Wellenlängen addieren sich zu einer Welle, die eine gewisse Zeit τ kohärent ist (siehe Abb. 4.5).

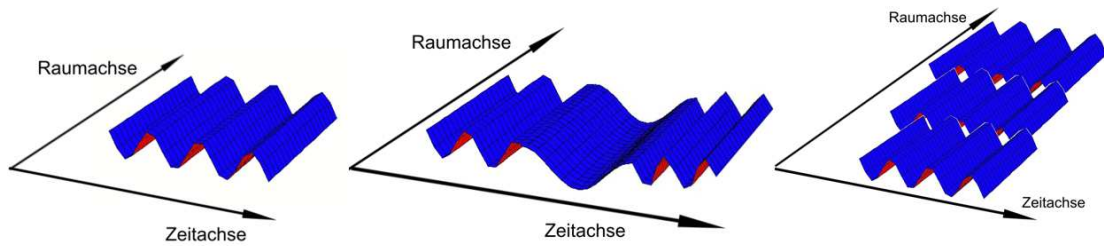


Abbildung 4.4: **links:** zeitlich und räumliche Kohärenz, **mitte:** räumliche Kohärenz, **rechts:** zeitliche Kohärenz

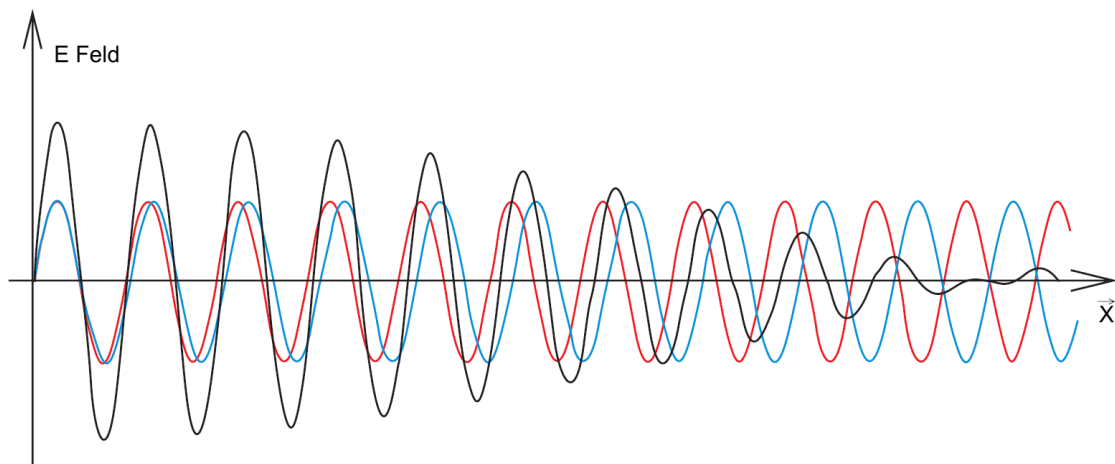


Abbildung 4.5: Addition zweier Wellen mit leicht unterschiedlichen Wellenlängen

Die Kohärenzlänge ist gerade die Länge, die die Welle in der Kohärenzzeit τ zurücklegt: $\tau = \frac{L}{c}$. Dabei hängt die Kohärenzzeit auf folgende Weise von der Frequenzbreite ab:

$$\tau \approx \frac{1}{\Delta f}. \quad (4.2)$$

Für die Frequenzbreite gilt dann in Abhängigkeit von der Kohärenzlänge folgendes:

$$\Delta f \approx \frac{c}{L}. \quad (4.3)$$

Licht, das kohärent ist, interferiert, sodass Interferenzmuster beobachtbar sind. Wenn man einen Lichtstrahl in zwei Wege aufteilt und dann wieder zusammenführt, entsteht nur dann ein Interferenzbild, wenn die beiden Wege sich maximal um die Kohärenzlänge

unterscheiden. Die Kohärenzlänge des Lichtes ist dann gerade die Differenz der beiden Wege:

$$L = x_2 - x_1. \quad (4.4)$$

Vorstellen kann man sich das folgendermaßen. Wenn alle Wellenzüge der Wellenlänge λ_1 interferieren, entsteht bei dem Abstand L ein Interferenzbild mit Minima und Maxima in bestimmten Abständen. Das passiert auch mit den Wellenzügen der Wellenlänge λ_2 . Wenn der Abstand gerade die Kohärenzlänge ist, fallen die Minima des einen Interferenzbildes mit den Maxima des anderen zusammen. Dann ist das Interferenzbild nicht zu erkennen, da die Farben nicht zu unterscheiden sind. Bei allen Abständen größer der Kohärenzlänge ist weiterhin kein Interferenzbild mehr sichtbar, da für jede Wellenlänge eine andere gefunden werden kann, dass die Minima des einen Interferenzbildes mit den Maxima des anderen zusammenfallen (vgl. (Eichler, 1974, S. 300 f.)).

4.1.3 Polarisation

Licht ist eine Transversalwelle, das heißt die Schwingungsrichtung ist senkrecht zur Ausbreitung der Welle. Dabei schwingen die elektrische Feldstärke und die magnetische Feldstärke senkrecht zueinander mit gleicher Frequenz (siehe Abb.: 4.6). Im Folgenden wird

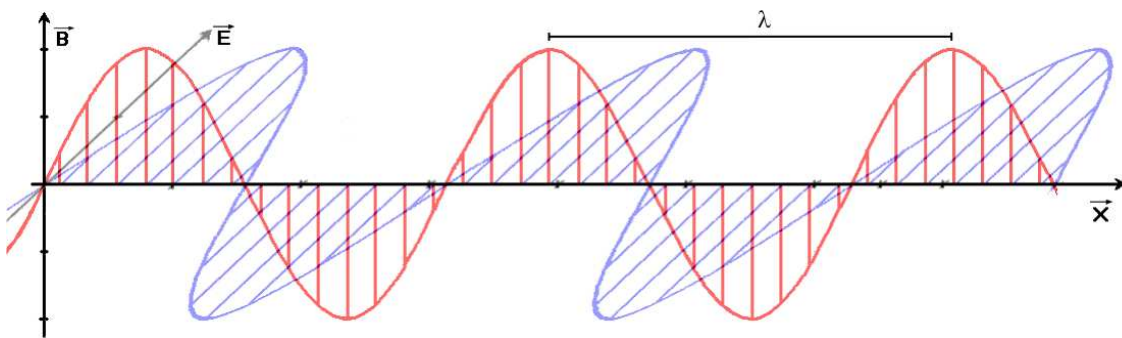


Abbildung 4.6: Elektrisches (blau) und magnetisches Feld(rot) einer sich nach rechts ausbreitender linear polarisierten Welle.

nur die elektrische Feldstärke betrachtet.

Durch die Schwingungsrichtung, kann das Licht unterschiedlich polarisiert sein. In dem Licht, das von Temperaturstrahlern wie die Sonne abgegeben wird, sind alle Polarisationsrichtungen gleichmäßig und ungeordnet vertreten. Wenn die elektrische Feldstärke immer

in der gleichen Richtung schwingt, ist das Licht linear polarisiert. Durch Überlagerung von zwei senkrecht zueinander stehenden linear polarisierten Lichtwellen verschiedener Amplitude entsteht, wenn der Gangunterschied 0 oder ein Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$ ist, wieder linear polarisiertes Licht. Wenn der Gangunterschied bei der Überlagerung dagegen $\frac{\lambda}{4}$ oder $\frac{3\lambda}{4}$ ist, entsteht elliptische polarisiertes Licht (siehe Abb.: 4.7). Falls die Amplitude beider Wellen gleich ist, entsteht zirkular polarisiertes Licht (vgl. (Eichler, 2006, S.296)).

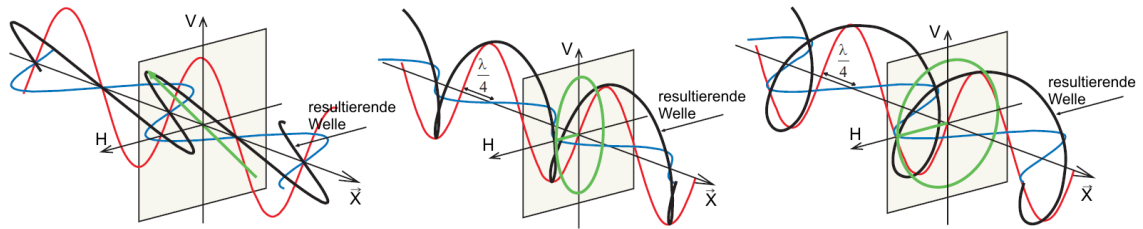


Abbildung 4.7: Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen. Die Resultierende ist **links**: linear polarisiert, **mitte**: elliptisch polarisiert, **rechts**: zirkular polarisiert. Dabei bezeichnet V vertikale Welle und H horizontale Welle.

Damit Licht interferiert, muss es zu den oben genannten Eigenschaften zusätzlich noch polarisiert sein.

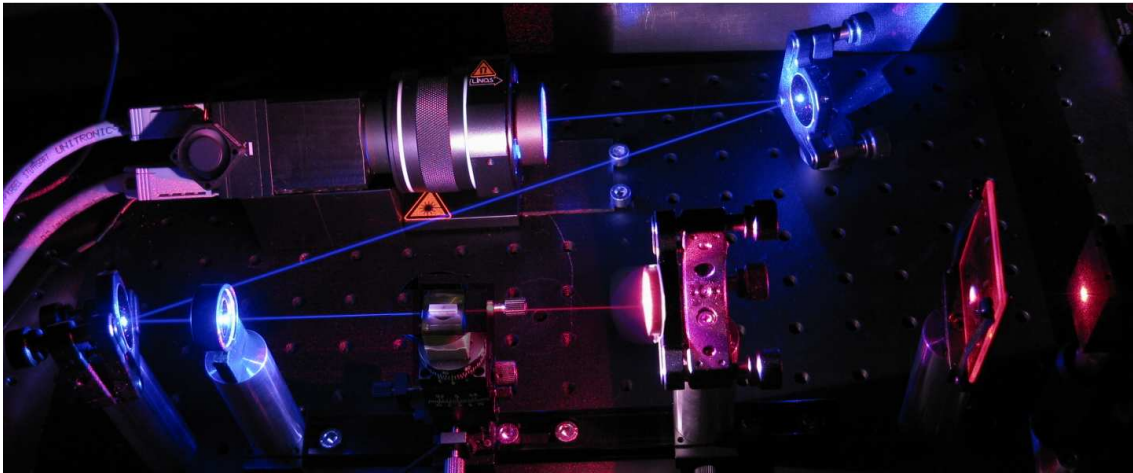
Laserlicht ist monochromatisch, auf langen Bereichen kohärent und polarisiert. Es ist somit gut geeignet, um Interferenzexperimente durchzuführen.

4.2 Laser

Optische Laser gibt es seit 1960. Der Kurzbegriff **Laser** bedeutet **light amplification by stimulated emission of radiation** (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Ein Laser besteht aus drei wesentlichen Bestandteilen: dem aktiven Medium, der Pumpe und dem Resonator, welche im folgenden vorgestellt werden.

4.2.1 Vom Bohrschen Atommodell zum Laser

Laser sind vielfältig angewandte Lichtquellen. Sie werden sowohl im alltäglichen Leben als auch in der physikalischen Forschung häufig genutzt. Das breite Spektrum von



Anwendungen reicht vom CD-Player, Drucker und Scanner zu Schweißarbeiten in der Automobilindustrie, zu Schneidearbeiten in Medizin und Metallverarbeitung, zur Kommunikation und Informationsübertragung bis hin zur Landvermessung (vgl. (Diehl, 2008, S. 354)).

Umso interessanter ist es, wie ein Laser funktioniert. Um das Prinzip eines Laser verstehen zu können, benötigt man zunächst eine Vorstellung über den Aufbau eines Atoms. Dazu reicht das Modell von Bohr, welches er 1913 entwickelt hat. Weitere Erkenntnisse über das Atommodell sind zwar sehr interessant, allerdings um den Laser verstehen zu können nicht notwendig. Im folgenden wird zunächst mit Hilfe des Bohrschen Atommodells das aktive Medium beschrieben, danach wird die Pumpe und anschließend der Resonator erklärt.

4.2.1.a Das aktive Medium

Das Bohrsche Atommodell

Nach Bohr liegt im Kern des Atoms die gesamte positive Ladung (Protonen). Der Kern selbst ist im Vergleich zum Atom sehr klein, beinhaltet aber den Großteil der Masse. Die negative Ladung stellen die sogenannten Elektronen dar, die sich auf Bahnen um den Kern herumbewegen (siehe Abb.: 4.8 links). Um die Energieniveaus der Elektronen zu verdeutlichen, verwendet man eine Darstellung wie in Abb.: 4.8 auf der rechten Seite. Dazu hat Bohr zwei Postulate aufgestellt:



Abbildung 4.8: links: Darstellung des Bohrschen Atommodells, rechts: Darstellung der Bahnen als Energieniveaus mit den Niveaus 1 und 2.

1. **Bohrsches Postulat** (Quantenbedingung): Es gibt nur bestimmte Bahnen, auf denen sich die Elektronen aufhalten können. Auf jeder Bahn hat das Elektron eine bestimmte Energie und bewegt sich dort strahlungsfrei, sodass keine Energie vom Elektron abgegeben wird.
2. **Bohrsches Postulat** (Frequenzbedingung): Beim Übergang von einer energiereicheren Bahn (E_n) zu einer energieärmeren Bahn (E_m) gibt das Atom Energie in Form eines Photons ab (Der Vorgang nennt sich Emission (emittieren = aussenden)). Dieses Photon besitzt dann genau die Energiedifferenz als Energie:

$$hf = E_n - E_m = \Delta E. \quad (4.5)$$

Der umgekehrte Vorgang nennt sich Absorption (absorbieren = absaugen). Dabei wird ein Atom durch ein Photon angeregt. Das bedeutet das Photon wird vom Atom aufgenommen und durch die Energie springt ein Elektron von einer energieärmeren zu einer energiereicheren Bahn.

Atome liegen meistens im Grundzustand vor, das heißt die energiearmen Bahnen, die dicht am Kern liegen, werden besetzt. Die Bahnen können nur mit einer bestimmten Anzahl von Elektronen besetzt werden. Je nachdem wie viele Elektronen das Atom besitzt, werden unterschiedlich viele Bahnen im Grundzustand besetzt.

Spontane Emission

Da der angeregte Zustand instabil ist, liegen die Atome meistens im Grundzustand vor. Ein angeregtes Atom fällt deshalb durch spontane Emission wieder zurück in den Grundzustand. Das Atom gibt dabei ein Photon der Energie ab, die der Energiedifferenz der beiden Bahnen entspricht, siehe Gleichung 4.5 (vgl. Abb.: 4.8), und verliert damit genau diese Energie. Das abgegebene Photon ist Licht mit der Frequenz f .

Den Effekt der spontanen Emission nutzt man beim Laser aus. Allerdings reicht dieser Effekt so noch nicht aus, da die Atome selten im angeregten Zustand vorliegen und damit Licht nur selten emittieren. Außerdem wird das emittierte Licht in eine willkürliche Richtung freigesetzt. Besser ist deshalb der Effekt der stimulierten Emission, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Stimulierte Emission und Besetzungsinversion

Ein Photon der Energiedifferenz $E_2 - E_1 = hf$ kann bei einem angeregten Atom ein Elektron von E_2 zu E_1 abrufen. Dabei gibt das Atom ein Photon ab. Das abgegebene Photon hat dann genau die gleiche Richtung, die gleiche Frequenz, Polarisation und Phase wie das einfallende Photon. Es liegen somit zwei genau gleiche Photonen vor. Zum Stimulieren eignet sich auch ein Photon, das durch spontane Emission entstanden ist. Das Atom wurde von dem Photon stimuliert, das heißt zu Resonanz angeregt (siehe Abb.: 4.9 links). Stehen genügend angeregte Atome zur Verfügung, wird eine Kettenreaktion ausgelöst und ein Wellenzug aus völlig gleichen Photonen entsteht.

Um diese Kettenreaktion hervorzurufen, müssen mehr Atome im angeregten Zustand vorliegen als im Grundzustand. Das wird Besetzungsinversion genannt. Wenn keine angeregten Atome vorliegen, kann auch kein Atom stimuliert werden.

Zu der Stimulation gibt es zusätzlich noch den entgegenwirkenden Prozess der Absorption. Wenn ein Photon auf ein Atom im Grundzustand trifft und die Frequenz zur Energiedifferenz der Bahnen passt, kann das Atom angeregt und dabei das Photon vernichtet werden (siehe Abb.: 4.9 rechts).

Je mehr Atome stimuliert wurden, desto mehr Photonen liegen vor. Allerdings liegen auch mehr Atome im Grundzustand vor. Diese absorbieren wieder die entstandenen Photonen.

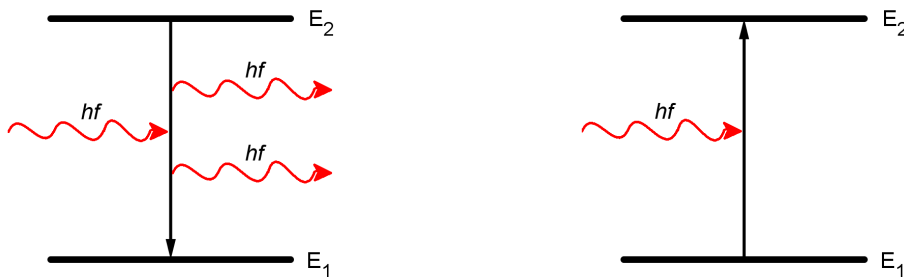


Abbildung 4.9: links: Übergang durch stimulierte Emission, rechts: Übergang durch Absorption

Da die Anzahl der Photonen durch beide Prozesse im Gleichgewicht liegen, kann kein Laserstrahl entstehen.

Die stimulierte Emission ist der Prozess, der zur Erzeugung von Laserlicht benötigt wird. Um diesen Prozess nutzen zu können, muss jetzt noch die Besetzungsinversion erreicht werden. Die Energiezufuhr dafür kann durch Pumpen zugefügt werden. Ein Beispiel dafür ist das optische Pumpen, welches im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird.

Das aktive Medium ist ein Material, das in den angeregten Zustand versetzt wird und dann durch Emissionen Photonen einer bestimmten Energie abgibt. Durch die Energie des abgegebenen Photons ist die Frequenz des Lichtes bestimmt:

$$hf = E_n - E_m = \Delta E.$$

4.2.1.b Optisches Pumpen

Es gibt verschiedene Arten von Pumpen: z.B. optisches Pumpen, elektrisches Pumpen, thermisches Pumpen und chemisches Pumpen. Im folgenden soll das optische Pumpen näher erläutert werden.

Beim optischen Pumpen wird das aktive Medium mit einer Lichtquelle beleuchtet. Diese Lichtquelle muss Licht emittieren, welches die Frequenz hat, die zur Energiedifferenz in den Atomen des aktiven Mediums passt. Dazu eignen sich Lampen, die bei den nötigen Frequenzen die maximale Intensität haben oder aber auch Laser der bestimmten Frequenzen. Die Photonen der Lichtquelle treffen auf das aktive Medium. Die Atome des aktiven Mediums absorbieren das Photon und liegen dann im angeregtem Zustand vor.

Damit die Besetzungsinversion hoch genug ist und die Absorption die stimulierte Emission nicht ausgleicht, muss das Pumplicht über einer gewissen Schwelle liegen. Danach steigt die Leistung des hergestellten Lasers linear bis zur Sättigung in Abhängigkeit von der eingesetzten Pumpleistung (vgl. Abb.: 4.10).

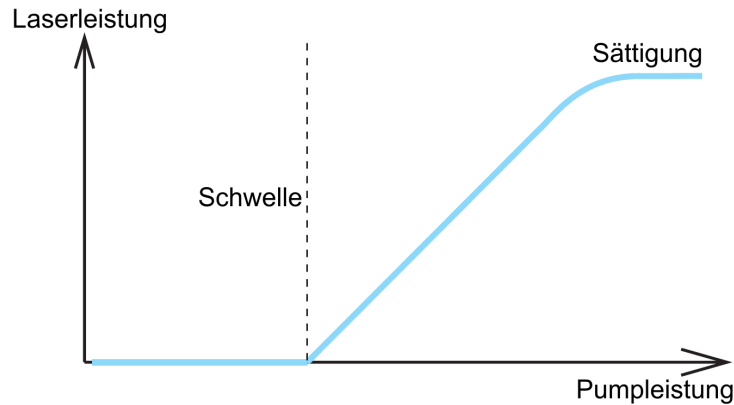


Abbildung 4.10: Laserleistung in Abhängigkeit von der Pumpleistung.

Mit optischen Pumpen können Atome in unterschiedliche angeregte Zustände versetzt werden. Drei verschiedene Realisationsmöglichkeiten werden im folgenden aufgeführt.

Das 2- Niveau- Schema: Das einfachste System einer Pumpe wäre, wenn die Pumpe (wie in Abb. 4.11 zu sehen ist) das Atom von Niveau 1 auf Niveau 2 anregt. Danach würde das Atom durch spontane Emission ein Photon abgeben und wieder auf Niveau 1 zurückfallen. Dieses eine Photon kann dann durch Stimulation weitere angeregte Atome dazu bringen, Photonen auszusenden. Damit ist das Problem gelöst, genügend Atome im

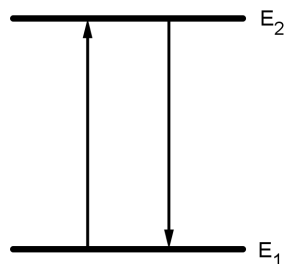


Abbildung 4.11: Pumpvorgang beim 2-Niveau Vorgang

angeregten Zustand zu erhalten.

Da allerdings die durch stimulierte Emission entstandenen Photonen durch die Absorption wieder verloren gehen und somit Emission und Absorption gleich häufig auftreten, sind keine Photonen übrig, die den Laser bilden. Der Pumpprozess darf daher nicht direkt mit dem Laserprozess zusammenhängen. Realisiert werden kann das mit den beiden folgenden Schemata.

Das 3- Niveau- Schema: Beim 3- Niveau- Schema (siehe Abb.: 4.12) wird durch den Pumpvorgang das Atom von Niveau 1 zu Niveau 3 angeregt. Niveau 3 sollte kurzlebig sein, sodass die Elektronen schnell in Niveau 2 springen. Außerdem sollte Niveau 2 sehr langlebig sein, sodass sich eine starke Besetzungsinversion im Niveau 2 herausbilden kann.

Der Unterschied zum 2- Niveau- Schema besteht darin, dass der Pumpvorgang unabhängig vom eigentlichen Laserprozess ist. Das heißt die Pumpe kann das aktive Medium nicht stimulieren und die Besetzungsinversion in Niveau 2 damit zerstören. Außerdem gibt es kein Photon im Pumplicht der Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$, das vom aktiven Medium absorbiert werden kann. Das 3- Niveau- Schema ist also geeignet, um einen La-

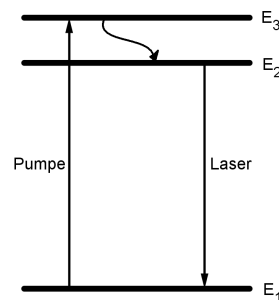


Abbildung 4.12: Pumpvorgang beim 3-Niveau Vorgang

ser zu realisieren.

Das 4- Niveau- Schema: Noch günstiger für die Realisation eines Lasers ist das 4- Niveau- Schema. Hierbei muss der Übergang von Niveau 3 zu Niveau 2 schnell passieren, sodass das Niveau 2 stark gefüllt ist. Der Übergang von Niveau 2 zu 1 ist der eigentliche Laserprozess, Niveau 2 sollte somit langlebig sein. Der Übergang von Niveau 1 zu 0 muss dann wieder schnell passieren, damit das Niveau 1 wenig besetzt ist. Dadurch ist eine starke Besetzungsinversion zwischen Niveau 2 und 1 erreicht.

Auch hier ist die Wellenlänge des Pumplichtes und somit die Energie des Pumplichtes anders als die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$, sodass die Besetzungsinversion nicht durch

gegenläufige Prozesse verhindert werden kann (siehe Abb.: 4.13). Der eigentliche Laserprozess ist hier vollständig vom Pumpprozess getrennt.

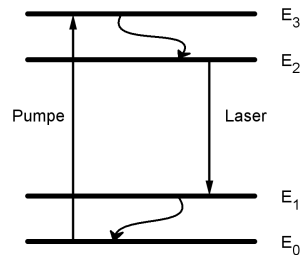


Abbildung 4.13: Pumpvorgang beim 4-Niveau Vorgang

Die Pumpe ist damit der zweite wesentliche Bestandteil eines Lasers.

4.2.1.c Der Resonator

Da die Verstärkung durch die einmalige Stimulation nicht ausreicht, da unterschiedliche Effekte die Anzahl der entstandenen Photonen vermindern, muss eine zusätzliche Verstärkung der Photonen vorgenommen werden. Dies passiert mit einem sogenannten Resonator, einem Komplex aus Spiegeln. Der einfachste Fall sind zwei gegenüberliegende Spiegel, die das Licht, was senkrecht auf diese fällt, hin und her reflektieren.

Damit die stimulierte Emission noch weiter verstärkt wird, befindet sich das aktive Medium in einem solchen Resonator. Durch Rückkopplung können die Photonen das aktive Medium mehrfach stimulieren, sodass die Verstärkung noch weiter erhöht wird (siehe Abb.: 4.14). Der Abstand der beiden Spiegel muss ein Vielfaches der halben Wellenlänge sein, damit im Resonator eine stehende Welle entsteht und die reflektierten Photonen weiterhin die gleiche Phase haben. Dabei werden nur Photonen weiter verstärkt, die senkrecht auf die Spiegel fallen, die anderen verlassen den Resonator seitlich. Die übrigen Photonen haben also alle die gleiche Richtung. Damit das Licht dann auch genutzt werden kann, ist der eine Spiegel leicht durchlässig und lässt typischerweise wenige Prozent der Photonen heraus (ca. 2%).

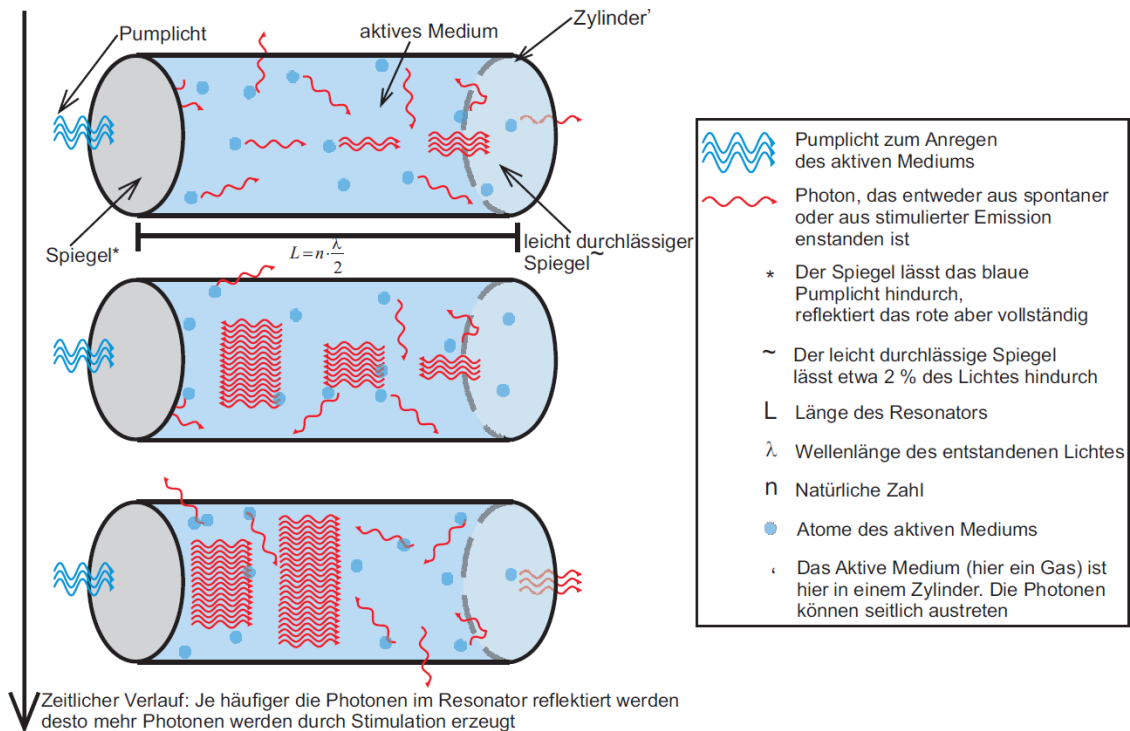


Abbildung 4.14: Stimulierte Emission wird mit Hilfe des Resonators noch weiter verstärkt.

4.2.1.d Gemeinsame Funktionsweise der drei Komponenten

Aus den drei Komponenten dem aktiven Medium, der Pumpe und dem Resonator besteht ein Laser (siehe Abb.: 4.15). Das aktive Medium wird durch das Pumplicht angeregt und somit wird eine Besetzungsinversion hergestellt. Durch spontane Emission entstehen Photonen mit einer bestimmten Frequenz, Richtung, Polarisation und Phase. Diese stimulieren weitere Atome und durch die stimulierte Emission entstehen Photonen gleicher Richtung, Frequenz, Polarisation und Phase wie die ursprünglichen Photonen. Durch Rückkopplung aufgrund eines Resonators wird das aktive Medium so häufig stimuliert, dass ein Laserstrahl entsteht. Dabei kommen nur die Photonen im Laser vor, deren Richtung senkrecht zu den Spiegeln ist.

4.2.2 Experimente zum Laser

Anschaulicher wird die Theorie mit dem folgenden Experiment. Das Zusammenspiel der drei Komponenten Pumplicht, aktives Medium und Resonator kann hier in der Praxis

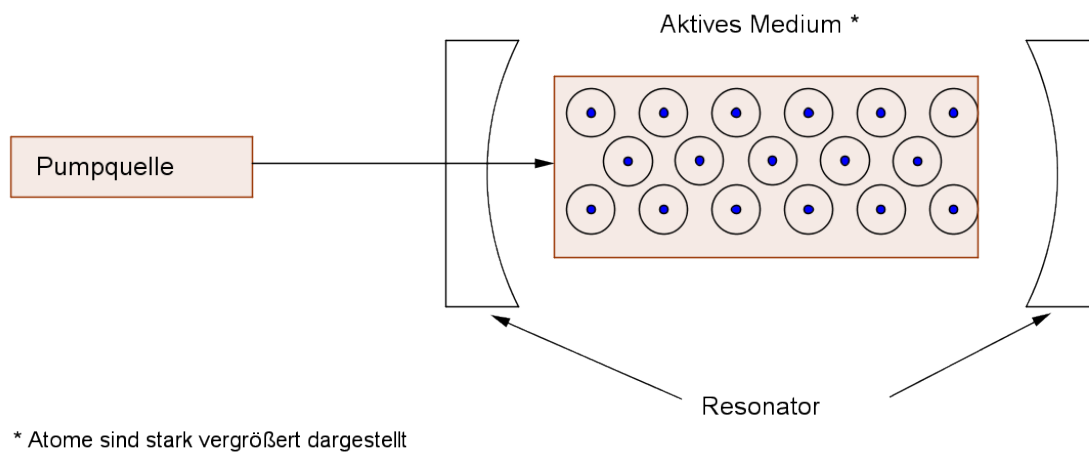


Abbildung 4.15: Aufbau eines Lasers.

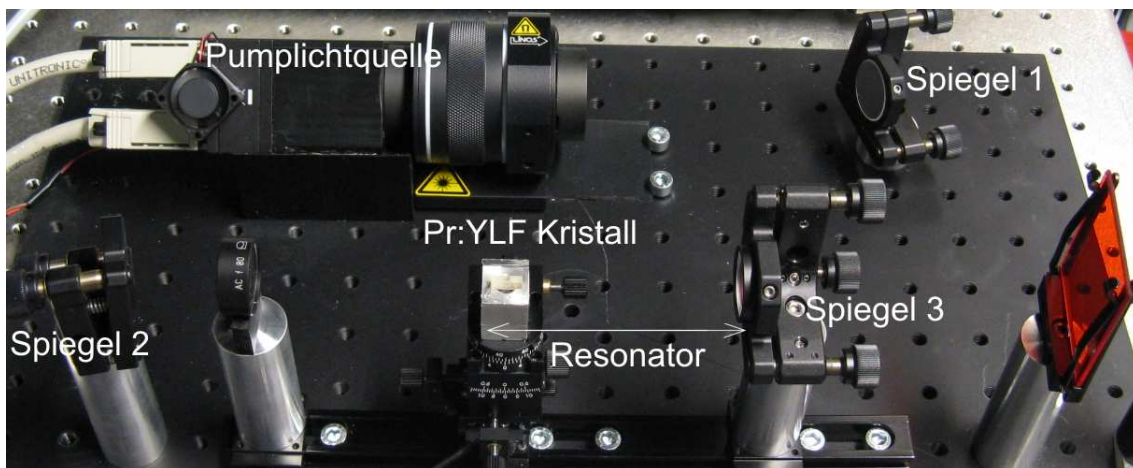


Abbildung 4.16: Aufbau des Lasers.

erprobt werden. Mit Hilfe eines blauen Diodenlasers, der dem optischen Pumpen dient, mehreren Spiegeln, für den Bau des Resonators, und einem Pr:YLF Kristalles als aktives Medium soll ein roter Laser gebaut werden.

Außerdem kann mit einem Laserleistungsmessgerät die Laserschwelle und die Abhängigkeit der Laserleistung von der Pumpleistung bestimmt werden.

Achtung, bei allen Versuchen mit dem Laser gilt:

- Schauen Sie nie in den Laser!!!
- Schalten Sie den Laser nur an, wenn er fest steht.

Justierung des Resonators zur Herstellung eines Lasers

- Verstellen Sie zunächst die Spiegel, sodass der Laserstrahl, der von der Pumpquelle ausgeht, genau mit dem am Spiegel 3 reflektierten Strahl zusammenfällt.
- Stellen Sie dann den Kristall, der das aktive Medium darstellt zwischen die Linse und den Spiegel 3. Die spiegelnde Grenzfläche des Kristalls muss im Brennpunkt der Linse liegen.
- Der Bereich zwischen der verspiegelten Seite des Kristalls und dem Spiegel 3 stellt den Resonator dar und muss ein Vielfaches der Wellenlänge¹ sein.
- Durch den Kristall verläuft der Strahlengang möglicherweise anders und muss neu justiert werden. Versuchen Sie die Justage immer feiner einzustellen, um die Pumpleistung so gering wie möglich einstellen zu können.

Bestimmung der Laserschwelle und der Abhängigkeit der Laserleistung von der Pumpleistung

- Bestimmen Sie mit Hilfe des Leistungsmessgerätes die Pumpleistung und die Laserleistung, wenn der Laser gerade eben noch nicht leuchtet. Achten Sie darauf, dass das Messgerät unterschiedliche Wellenlängenbereiche besitzt!
- Wiederholen Sie das für mehrere Pumpleistungen, wenn der Laser leuchtet.
- Stellen Sie die Abhängigkeit der Laserleistung von der Pumpleistung grafisch dar.

¹Der Abstand ist so groß und die Wellenlänge so klein, dass dies fast immer der Fall ist.

4.3 Interferometer

Die Überlagerung zweier Strahlen, die durch Aufspaltung eines Laserstrahls entstanden sind, sind besser für Interferenzversuche geeignet als zwei Strahlen aus unterschiedlichen Lichtquellen. Genau diese Aufspaltung und die anschließende Überlagerung wird durch Interferometer erreicht. Man kann mit Interferometern präzise Messungen mit Hilfe des Interferenzmusters durchführen. Interferometer gehören zu den genauesten Messsystemen in der Optik. Sie werden für die Längenmessung, für die Prüfung der Oberflächenbeschaffenheit von optischen Systemen und Kalibrierung von Präzisionsmesstischen eingesetzt (vgl. (Schott, 2008, S.77)).

4.3.1 Michelson - Interferometer

Das Michelson - Interferometer (siehe Abb.: 4.17) ist dazu geeignet kleine Weglängendifferenzen auszumessen.

Das Licht (hier: von einem Laser) wird an einem Strahlteiler in zwei Lichtbündel aufgeteilt. Nachdem beide an einem Spiegel reflektiert wurden, treffen sie wieder auf den Strahlteiler und gelangen dann zusammen zu einem Schirm. Wenn die Weglängen, die beide Teilbündel durchlaufen haben, unterschiedlich lang sind, entsteht ein Interferenzbild auf dem Schirm.

Wird nun ein Spiegel längs der optischen Achse um Δd bewegt, wechseln sich in der Mitte des Interferenzmusters Minima und Maxima ab.

Bei der Durchführung von Interferenzexperimenten ist es wichtig die Kohärenzlänge (vgl. Abschnitt 4.1.2) des jeweiligen Lasers zu kennen. Dies kann man mit Hilfe des Michelson - Interferometers herausfinden. Dazu stellt man den einen Spiegel so weit vom Strahlteiler entfernt auf, dass gerade eben keine Interferenz mehr beobachtet werden kann. Der andere Spiegel steht möglichst dicht am Strahlteiler. Die Kohärenzlänge L_K ist dann gerade die Weglängendifferenz der beiden Strahlenlängen im Interferometer. Da jeder der Wege x_1 und x_2 doppelt durchlaufen wird, muss diese Differenz verdoppelt werden:

$$L_K = 2(x_2 - x_1). \quad (4.6)$$

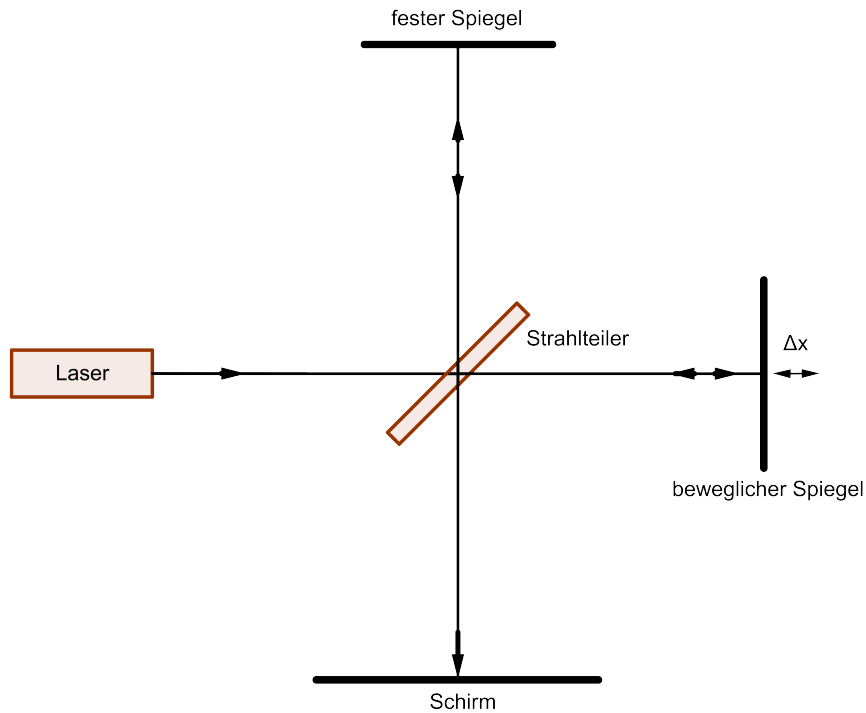


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung vom Aufbau des Michelson-Interferometers

Die Kohärenzlänge vom Laserlicht kann mit Hilfe des Michelson - Interferometers ermittelt werden. Die Kohärenzlänge ist, wenn gerade keine Interferenz mehr auftritt, gerade die Weglängendifferenz der beiden durchlaufenden Wege:

$$L_K = 2(x_2 - x_1).$$

Dabei ist x_1 gerade der Abstand vom Strahlteiler zum Spiegel 1 und x_2 der Abstand zum Spiegel 2. Daraus lässt sich die Frequenzbreite des Lichtes ermitteln:

$$\Delta f \approx \frac{c}{L_K},$$

wobei L_K die Kohärenzlänge und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

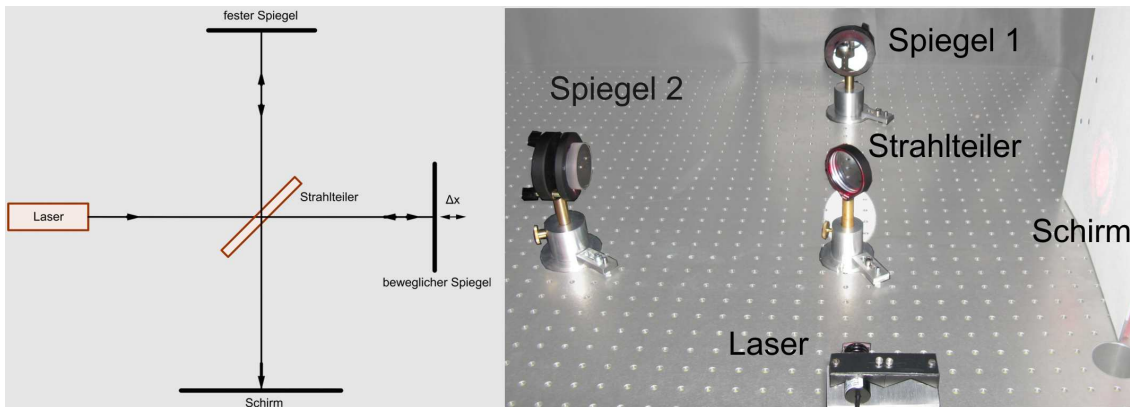


Abbildung 4.18: Aufbau des Michelson-Interferometers.

4.3.2 Experimente zum Michelson - Interferometer

In diesem Versuch soll zunächst ein Michelson - Interferometer so aufgebaut werden, dass Interferenzen entstehen. Anschließend soll die Kohärenzlänge und die Frequenzbreite des Laserlichtes bestimmt werden.

Achtung, bei allen Versuchen mit dem Laser gilt:

- Schauen Sie nie in den Laser!!!
- Schalten Sie den Laser nur an, wenn er fest steht.

Materialien

Verschiedene Laser, 2 Spiegel, Strahlteiler, Schirm

Aufbau des Interferometers

Richten Sie zunächst den Laser so aus, dass der Strahlteiler mittig beleuchtet wird. Der Strahlteiler sollte etwa in 45° zum einfallenden Licht stehen, damit die eine Hälfte des Lichtes im 90° Winkel reflektiert wird und die andere Hälfte gerade durch den Strahlteiler hindurchgeht. Stellen Sie nun den einen Spiegel in den Strahlengang des am Strahlteiler reflektierten Strahls. Das Licht wird wiederum reflektiert und geht durch den Strahlteiler hindurch. Auf der anderen Seite platzieren Sie einen weißen Schirm.

Danach stellen Sie den anderen Spiegel in den Strahlengang des Strahls, der direkt vom Laser durch den Strahlteiler hindurchkommt. Ihr Aufbau sollte nun so ähnlich aussehen wie in Abbildung 4.17. Achten Sie dabei darauf, dass die beiden Lichtflecke auf dem weißen Schirm genau aufeinander liegen. Falls die Flecke nicht direkt aufeinander liegen, drehen Sie einen der Spiegel leicht, bis die Lichtflecke genau aufeinander liegen. Im besten Fall ist nun schon ein Interferenzmuster zu sehen. Falls das nicht der Fall ist, können Sie mit Hilfe der drei Schrauben an den Ecken des Spiegels den Spiegel leicht verkippen bis die Kreisringe des Interferenzmusters zu sehen sind.

Bestimmung der Kohärenzlänge

- Stellen Sie wie im Abschnitt oben beschrieben den einen Spiegel des Interferometers nah an den Strahlteiler. Stellen Sie dann den anderen Spiegel ein wenig weiter weg vom Strahlteiler als im Abschnitt „Aufbau des Interferometer“.
- Stellen Sie nun die Verkipfung der Spiegel so ein, dass das Interferenzbild entsteht.
- Schieben Sie den verschiebbaren Spiegel um weitere 10 cm nach hinten und justieren ihn so, dass das Interferenzbild entsteht.
- Wiederholen Sie diese Prozedur so lange, bis kein Interferenzbild mehr sichtbar ist. Aus den Entfernungen der Spiegel zum Strahlteiler können Sie nun die Kohärenzlänge bestimmen.
- Bestimmen Sie mit Hilfe der Kohärenzlänge die Frequenzbreite des Lasers!

4.3.3 Mach - Zehnder - Interferometer

Ein weiteres wichtiges Interferometer ist das Mach - Zehnder Interferometer (siehe Abb.: 4.19). Ludwig Mach und Ludwig Zehnder entwickelten es 1891/92 unabhängig voneinander.

Der wesentliche Unterschied zum Michelson - Interferometer besteht darin, dass es zwei Ausgänge am Interferometer gibt. Die beiden Teilstrahlen können gleichzeitig beobachtet und miteinander verglichen werden. Aufgrund der Phasenverschiebungen in den Strahlteilern und Spiegeln entsteht bei den beiden Ausgängen ein unterschiedliches Interferenzbild. Bei dem Einen entsteht durch konstruktive Interferenz ein Maximum in der Mitte des Interferenzbildes beim Anderen ein Minimum.

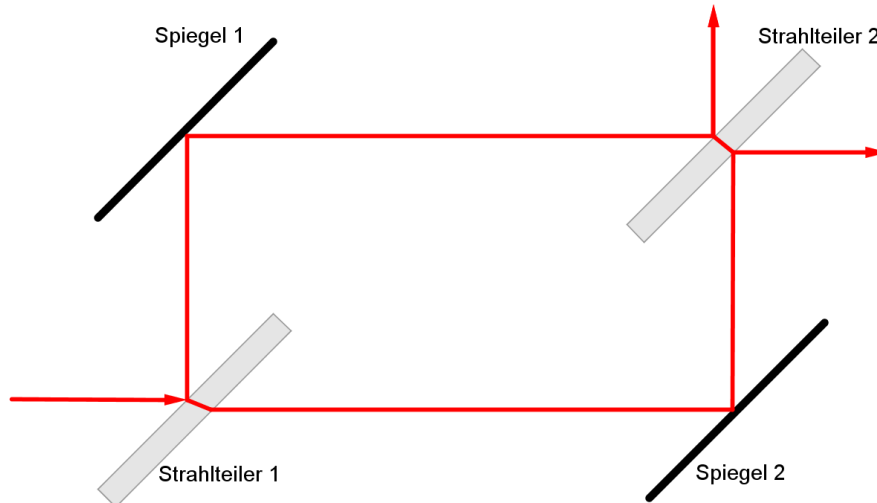


Abbildung 4.19: Schematische Darstellung vom Aufbau des Mach - Zehnder - Interferometers

Um mit dem Mach - Zehnder - Interferometer die Wellenlänge des einfallenden Lichtes bestimmen zu können, wird der zweite Strahlteiler minimal verkippt. Nun wird nur ein Ausgang des Interferometers betrachtet. Die ausfallenden Strahlen gehen minimal auseinander. Kurz hinter den Strahlteiler wird eine Linse gestellt, die die Strahlen fokussiert und dadurch zwei punktförmige Lichtquellen L_1 und L_2 erzeugt (siehe Abb.:4.20). Dies ist der Fall, da Laserstrahlen parallele Lichtbündel sind. Die entstandenen punktförmigen Lichtquellen emittieren kohärentes Licht.

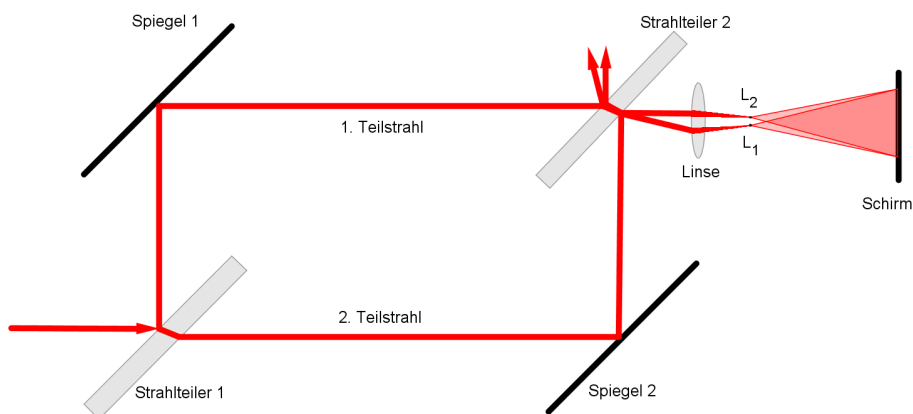


Abbildung 4.20: Punktförmige Lichtquellen beim Mach - Zehnder - Interferometer durch einen schrägen Strahlteiler und eine Linse

Das von den punktförmigen Lichtquellen ausgehende Licht kann dann miteinander interferieren. Es entsteht ein Interferenzbild aus parallelen nahezu gleich weit entfernten Linien. Die zwei Strahlen interferieren genau dann, wenn der Wellenlängenunterschied ein Vielfaches der Wellenlänge ist (siehe Abb.:4.21). Es muss also gelten:

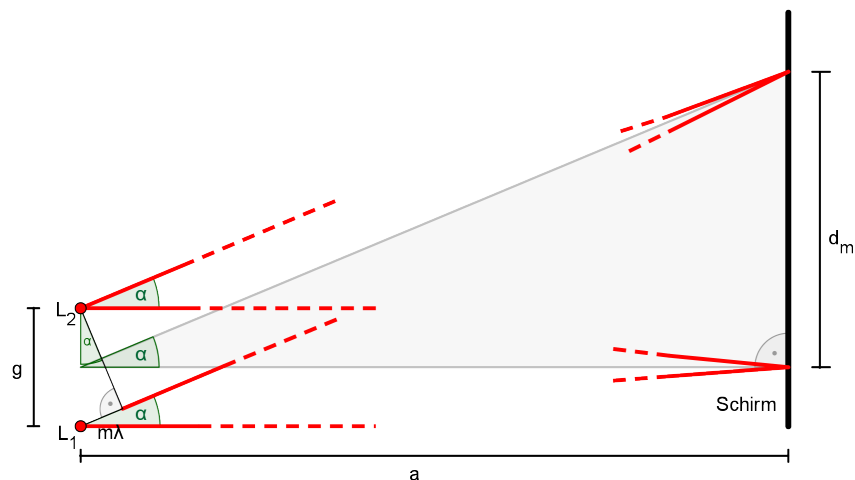


Abbildung 4.21: Systematische Zeichnung zur Herleitung des Interferenzmusters zweier Punktquellen

$$\sin \alpha_m = \frac{m \cdot \lambda}{g} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4.7)$$

Dabei ist g gerade der Abstand der beiden Punktquellen voneinander und α_m der Winkel zum m -ten Maximum. Da sich der Winkel α_m nicht messen lässt, wird dieser über den Abstand a von der Punktquelle zum Schirm und dem Abstand d_m vom 0. Maximum zum m -ten Maximum ermittelt. Es gilt:

$$\tan \alpha_m = \frac{d_m}{a}. \quad (4.8)$$

Da der Winkel α sehr klein ist, kann mit folgender Näherung gerechnet werden:

$$\sin \alpha_m \approx \tan \alpha_m. \quad (4.9)$$

Somit gilt:

$$\frac{m\lambda}{g} \approx \frac{d_m}{a} \Rightarrow \lambda \approx \frac{d_m g}{ma}. \quad (4.10)$$

Der Abstand der beiden Punktquellen liegt im Bereich von einigen Mikrometern und ist somit relativ schwer zu messen.

Eine Alternative zum Messen des Abstandes der beiden Punktquellen besteht darin, diesen Abstand durch andere leicht zu messende Größen zu bestimmen. Wenn man die Linse aus dem Strahlengang wieder entfernt, bekommt man einen Strahlenverlauf wie in Abb. 4.22. Der Winkel α zwischen den beiden Teilstrahlen lässt sich durch den Abstand des Strahl-

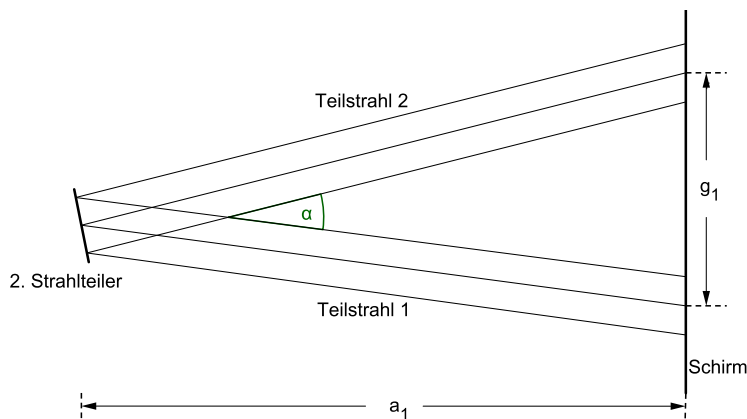


Abbildung 4.22: Darstellung des strahlenverlaufes hinter dem zweiten Strahlteiler ohne Linse.

teilers zum Schirm a_1 und dem Abstand zwischen den Lichtpunkten auf dem Schirm g_1 (diese beiden Werte lassen sich leicht messen) ermitteln:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{g_1}{2a_1}. \quad (4.11)$$

Wenn man die Linse wieder in den Strahlengang stellt, kann man näherungsweise davon ausgehen, da das Strahlenbündel im Verhältnis zur Linse sehr groß ist, dass die beiden Teilstrahlen durch den Mittelpunkt gehen. Aus dem eigentlichen Bild 4.23 auf der linken Seite entsteht das Bild 4.23 auf der rechten Seite, wobei die Strahlenbündel nur parallel in die Mitte der Linse verschoben wurden. Da nur eine Parallelverschiebung vorgenommen

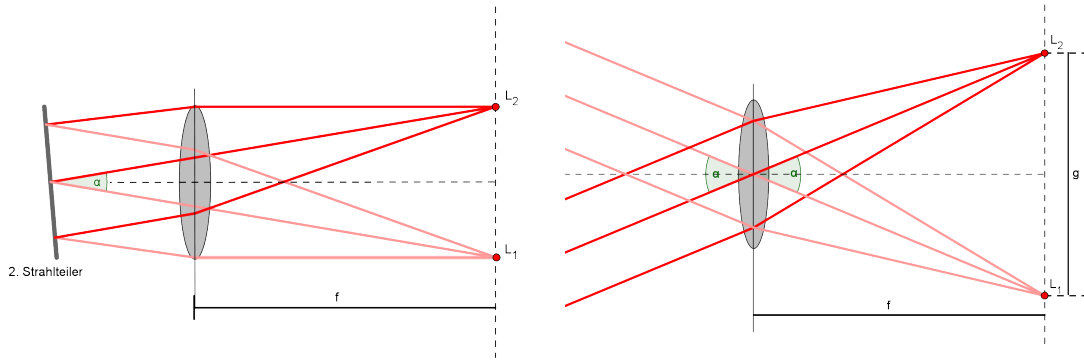


Abbildung 4.23: Vereinfachung des Strahlenganges zur Bestimmung des Winkels α . Links der ursprüngliche Strahlenverlauf, rechts: Parallelverschiebung der Strahlen.

wurde, ist der Winkel α der gleiche wie der ohne Linse. Mit Hilfe dieses Winkels lässt sich nun der Abstand der beiden Punktquellen errechnen, denn es gilt:

$$\frac{g}{2} = f \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (4.12)$$

wobei f die Brennweite der Linse ist. Durch Einsetzen der Gleichungen (4.11) und (4.12) in Gleichung (4.10) kann g ersetzt werden, sodass folgende Gleichung für die Wellenlänge entsteht:

$$\lambda \approx \frac{d_m f g_1}{m a a_1}. \quad (4.13)$$

Die nötigen Parameter für diese Gleichung lassen sich im Versuch gut nachmessen.

Mit Hilfe des Mach - Zehnder - Interferometers lässt sich die Wellenlänge des einfallenden Laserlichtes bestimmen:

$$\lambda \approx \frac{d_m f g_1}{m a a_1}.$$

Dabei ist d_m der Abstand vom nullten bis zum m -ten Maximum, f die Brennweite der Linse, m die Anzahl der Maxima, a der Abstand der Punktlichtquellen zum Schirm, g_1 der Abstand der Lichtpunkte auf dem Schirm, wenn die Linse nicht im Strahlengang steht und a_1 der Abstand des Strahlteilers zum Schirm.

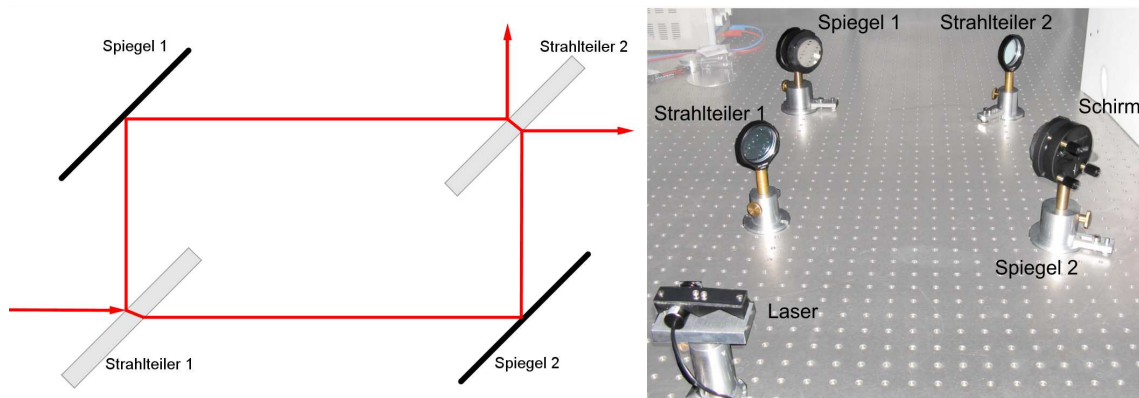


Abbildung 4.24: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers.

4.3.4 Experiment zum Mach - Zehnder - Interferometer

In diesem Versuch wird zunächst das Mach - Zehnder - Interferometer aufgebaut. Anschließend soll mit Hilfe von Linsen die Wellenlänge des Lasers bestimmt werden.

Achtung, bei allen Versuchen mit dem Laser gilt:

- Schauen Sie nie in den Laser!!!
- Schalten Sie den Laser nur an, wenn er fest steht.

Materialien

Verschiedene Laser, 2 Spiegel, 2 Strahlteiler, Schirm, Maßstab

Aufbau des Interferometers

Bauen Sie das Mach - Zehnder - Interferometer auf, wie in Abb. 4.24 zu sehen ist. Richten Sie den Laser, die Strahlteiler und die Spiegel dabei so aus, dass die Strahlen entlang der Lochreihen auf dem Optiktisch laufen, um kontrollieren zu können, dass die Strahlen gerade durch die Strahlteiler laufen.

Richten Sie die Spiegel so aus, dass die Strahlen genau überlagert werden. Dies erreichen Sie durch das Verstellen der Verkippung der Spiegel. Dann ist auch das Interferenzbild zu sehen.

Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes

- Drehen Sie den einen Strahlteiler ein wenig, sodass auf dem Schirm kein Interferenzbild mehr sondern zwei Lichtflecken sichtbar sind. Messen Sie den Abstand des Schirms zum Strahlteiler und den Abstand der beiden Lichtflecken.
- Stellen Sie dann eine Linse hinter den Strahlteiler. Es entstehen zwei punktförmige Lichtquellen im Abstand von der Brennweite der Linse. Halten Sie ein Blatt Papier in den Strahlenverlauf, um diese zu sehen. Auf dem Schirm ist ein Interferenzmuster aus Linien entstanden.
- Messen Sie nun den Abstand der Punktlichtquellen zum Schirm, die Brennweite der Linse, falls diese nicht bekannt ist und den Abstand vom nullten bis zum m -ten Maximum auf dem Schirm. Da die Linien gleich weit voneinander entfernt sind, wählen Sie einfach eine Linie als nullte Ordnung.
- Bestimmen Sie nun aus den ermittelten Größen die Wellenlänge des genutzten Lasers.

4.4 Akusto-optischer Effekt

Durch den akusto-optischen Effekt kann bei einem Laser sowohl Frequenz als auch Amplitude modulieren werden. Dabei wird dem Laser eine minimal andere Frequenz aufgezungen als vorher vorhanden ist.

Dieser Effekt wird in der Telekommunikation und Datenübertragung genutzt. Durch die Schallwelle ist die Schaltzeit vorgegeben, sie liegt bei einigen Nanosekunden. In der Laserphysik wird die Frequenz- und Amplitudenmodulation in verschiedensten Bereichen verwendet. Die Bauteile nennen sich Akusto-optische-Modulatoren (AOM).

Auch eine Frequenzselektion ist durch den AOM möglich. Dies wird bei mehrfarbigen Lasershows angewandt.

Was beim akusto - optische Effekt genau passiert, wird im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

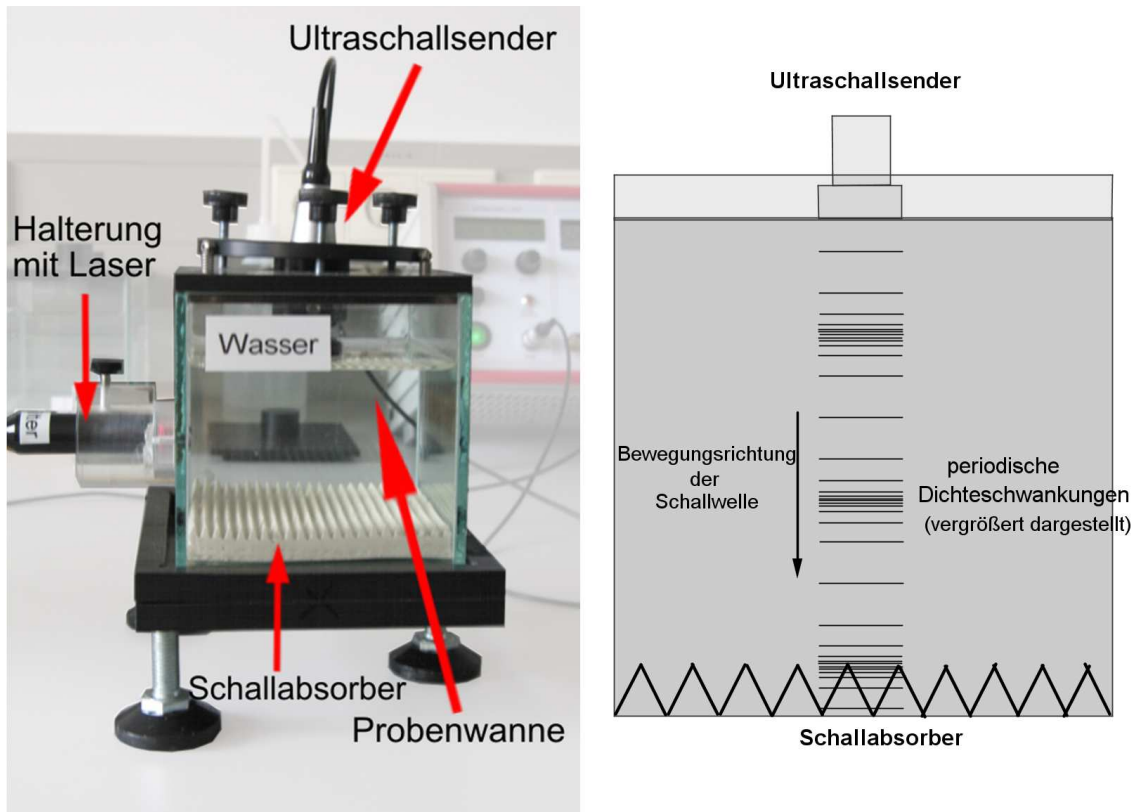


Abbildung 4.25: Probenwanne mit Schallabsorber

4.4.1 Der akusto-optische Effekt

Licht wird in einer Flüssigkeit durch eine Ultraschallwellen gebeugt. Schall breitet sich in Flüssigkeiten nur longitudinal aus, d. h. die Schwingung ist in Ausbreitungsrichtung der Welle (vgl. (Gobrecht, 1990, S.541)).

Longitudinalwellen erzeugen in einem Medium periodische Dichteschwankungen, die Änderungen der Brechungseigenschaften des Mediums verursachen. Durch Schallwellen wird in einem Medium eine Art Gitter erzeugt. An diesem Gitter wird Licht, das das Medium durchstrahlt, gebeugt.

Damit die Schallwelle das Medium nicht zweimal durchläuft, ist am Boden der Probenwanne ein Schallabsorber, hier eine Gummischicht, eingebaut (siehe Abb.: 4.25).

Beugung an der Ultraschallwelle

Wenn monochromatisches, kohärentes und polarisiertes Licht senkrecht zur Ausbreitung der Ultraschallwelle das Medium durchstrahlt, wird dieses an der Ultraschallwelle gebeugt. Die Beugung ist wie beim optischen Gitter, weswegen im folgenden auch von der Gitterkonstante gesprochen wird. Die Gitterkonstante (Abstand der Gitterlinien) ist dann gerade die Wellenlänge Λ der Ultraschallwelle.

Dabei bildet sich unter einem bestimmten Winkel genau dann ein Maximum aus, wenn die einzelnen Strahlen konstruktiv interferieren (das heißt der Gangunterschied muss ein Vielfaches der Wellenlänge sein), im anderen Fall Minima. Die Bedingung für ein Maximum ist dann gerade:

$$\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{\Lambda}, \quad (4.14)$$

wobei α_n gerade der Ausfallswinkel, bei dem das Maximum n-ter Ordnung entsteht, ist. Außerdem ist λ die Wellenlänge des Lichtes und Λ die Wellenlänge des Ultraschalls (siehe Abb.: 4.26).

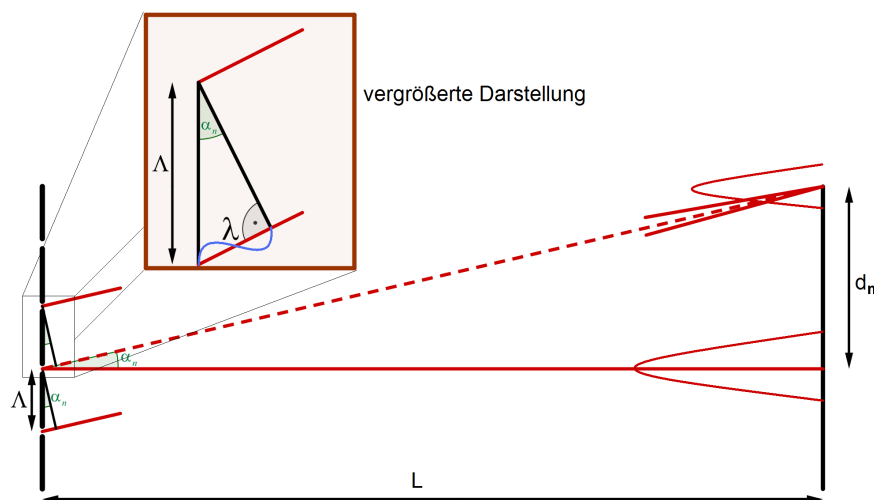


Abbildung 4.26: schematische Darstellung für die Bedingung für Maxima

Da der Winkel α_n nicht gemessen werden kann, wird dieser über den Abstand L des Schirmes zum Medium und den Abstand d_n von der nullten Ordnung zur n -ten Ordnung der Maxima auf folgende Weise bestimmt:

$$\tan \alpha_n = \frac{d_n}{L}. \quad (4.15)$$

Der Abstand L ist im Verhältnis zu d_n sehr groß. Dadurch ist der Winkel α_n so klein, dass mit der Näherung

$$\sin \alpha_n \approx \tan \alpha_n = \frac{d_n}{L}, \quad (4.16)$$

gerechnet werden kann. Somit folgt für die Bedingung der Maxima die Gleichung:

$$\frac{n \cdot \lambda}{\Lambda} = \frac{d_n}{L} \Rightarrow \Lambda = n \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d_n}, \quad (4.17)$$

die ohne Winkel auskommt.

Mit Hilfe dieser Beugungserscheinung ist es möglich, die Wellenlänge von Schall in verschiedenen Medien zu bestimmen, da die Beugung direkt von der Wellenlänge des Ultraschalls abhängt. Für die Wellenlänge des Schalls bzw. die Schallgeschwindigkeit gilt:

$$\Lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow c = \Lambda \cdot f, \quad (4.18)$$

dabei ist c die Schallgeschwindigkeit und f die Frequenz in dem jeweiligem Medium. Aus 4.17 und 4.18 lässt sich dann sofort die Gleichung für die Schallgeschwindigkeit in Medien herleiten:

$$c = n \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{f}{d_n}. \quad (4.19)$$

Laserlicht wird an einer Ultraschallwelle in einem Medium gebeugt wie an einem Gitter. Die Wellenlänge Λ der Ultraschallwelle ist die Gitterkonstante. Durch das entstandene Beugungsbild lässt sich die Schallgeschwindigkeit in dem jeweiligen Medium bestimmen:

$$c = n \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{f}{d_n}$$

Dabei ist n die gewählte Beugungsordnung, λ die Wellenlänge des Lichtes, f die Frequenz der Ultraschallwelle, L der Abstand vom Gitter zum Schirm und d_n der Abstand von der nullten zur n -ten Beugungsordnung.

Frequenzänderung durch die Ultraschallwelle

Durch die Beugung an der fortlaufenden Schallwelle verändert sich zusätzlich die Frequenz f_L des Lichtes. Dies lässt sich im Teilchenbild verstehen.

Die Photonen des einfallenden Lichtes haben die Energie $E_{phot} = h \cdot f_L$. Die akustische Welle kann als Quasiteilchenstrom aufgefasst werden. Die sogenannten Phononen haben die Energie $E_{phon} = h \cdot f_S$, wobei f_S die Frequenz des Schalls ist. Die einlaufenden Photonen treffen auf die Phononen des Ultraschalls. Dabei wird entweder ein Phonon vernichtet (absorbiert) oder eins erzeugt (emittiert) (vgl. Abb.: 4.28). Es können auch mehrere Phononen auf das Photon treffen, das Photon wird je nach Anzahl der Phononen unterschiedlich gebeugt und bekommt abhängig von der Anzahl der Phononen die zusätzliche Frequenz. Nach dem Energieerhaltungssatz gilt für die Energie des Lichtes: $E_{vor} = E_{nach}$, das bedeutet für die Frequenz f_L des Lichtes folgendes:

$$E_{vor} = hf_L \pm nhf_S = h \cdot f_{L_n} = E_{nach} \quad (4.20)$$

Der Frequenzunterschied nennt sich Frequenzshift. Das Licht hat nach dem Energieerhaltungssatz, wie in Gleichung (4.20) schon zu sehen ist, folgende Frequenz:

$$f_{L_n} = f_L \pm nf_S \quad (4.21)$$

Der Frequenzunterschied ist also gerade eine Vielfaches der Ultraschallfrequenz. Da der Frequenzunterschied so gering ist im Verhältnis zur Lichtfrequenz, kann er nur schwer direkt gemessen werden. Man kann aber zwei Strahlen unterschiedlicher Ordnungen überlagern und die Schwebungsfrequenz ermitteln. Die Schwebungsfrequenz $f_{Schwebung}$ ist

dann gerade die Frequenzdifferenz der beiden Lichtstrahlen $f_{Schwebung} = f_1 - f_2 = n \cdot f_s$. Dieses Phänomen ist beispielsweise aus der Akustik bekannt. Wenn zum Beispiel eine Gitarre gestimmt wird, werden zwei Saiten mit gleichem Ton angeschlagen. Stimmen die Töne nicht genau überein, hört man die Schwebung. Je genauer die Töne übereinstimmen desto kleiner ist die Schwebungsfrequenz. Wenn man keine Schwebung mehr hört, stimmen die Töne überein.

Mit einer Photodiode kann die Intensität des Lichtes aufgenommen werden. Die Lichtintensität einer elektromagnetischen Welle ist proportional zum Quadrat der maximalen elektrischen Feldstärke. Deshalb ist die Intensität jeder Beugungsordnung zeitlich konstant (vgl. Abb.: 4.27 links).

Überlagert man die Schwingungen der beiden Ordnungen, dann schwingt die Intensität der resultierenden Schwingung gerade mit der Schwebungsfrequenz $f_{Schwebung}$. Diese kann man dann direkt vom Oszilloskop ablesen (vgl. Abb.: 4.27 rechts).

In Abbildung 4.27 ist auf der linken Seite das Licht aus einer Beugungsordnung zu sehen. Das oberste Bild stellt die elektrische Feldstärke dar. Darunter ist das Quadrat der elektrischen Feldstärke zu sehen. Daraus ergibt sich die Intensität, die im untersten Bild zu erkennen ist.

Auf der rechten Seite der Abbildung 4.27 ist oben die elektrische Feldstärke zweier Wellen aus unterschiedlichen Beugungsordnungen zu sehen. Aus diesen beiden ergibt sich die Addition beider im Bild darunter. Das dritte Bild von oben stellt das Quadrat der elektrischen Feldstärke aus der Addition beider Wellen dar. Zuletzt ist die Intensität der Überlagerung zu sehen. Aus dem Impulserhaltungssatz kann zusätzlich noch die Bedingung für die Interferenzmaxima hergeleitet werden, es gilt: $\vec{p}_{Photon} = \vec{p}_{Photon'}$. Da es sich um vektorielle Größen handelt, muss man die Richtung der Teilchen beachten. Das Photon hat den Impuls $p_{Photon} = \frac{h}{\lambda}$ und das Phonon den Impuls $p_{Phonon} = \frac{h}{\Lambda}$. Wie in Abb.: 4.28 zu sehen ist, lässt sich der Winkel α_n , um den das Photon abgelenkt wird, wie folgt berechnen. Dabei ist n die Anzahl der Phononen bzw. die Beugungsordnung:

$$\tan \alpha_n = \frac{n \cdot p_{Phonon}}{p_{Photon}} = \frac{n \cdot \frac{h}{\Lambda}}{\frac{h}{\lambda}} = \frac{n\lambda}{\Lambda}. \quad (4.22)$$

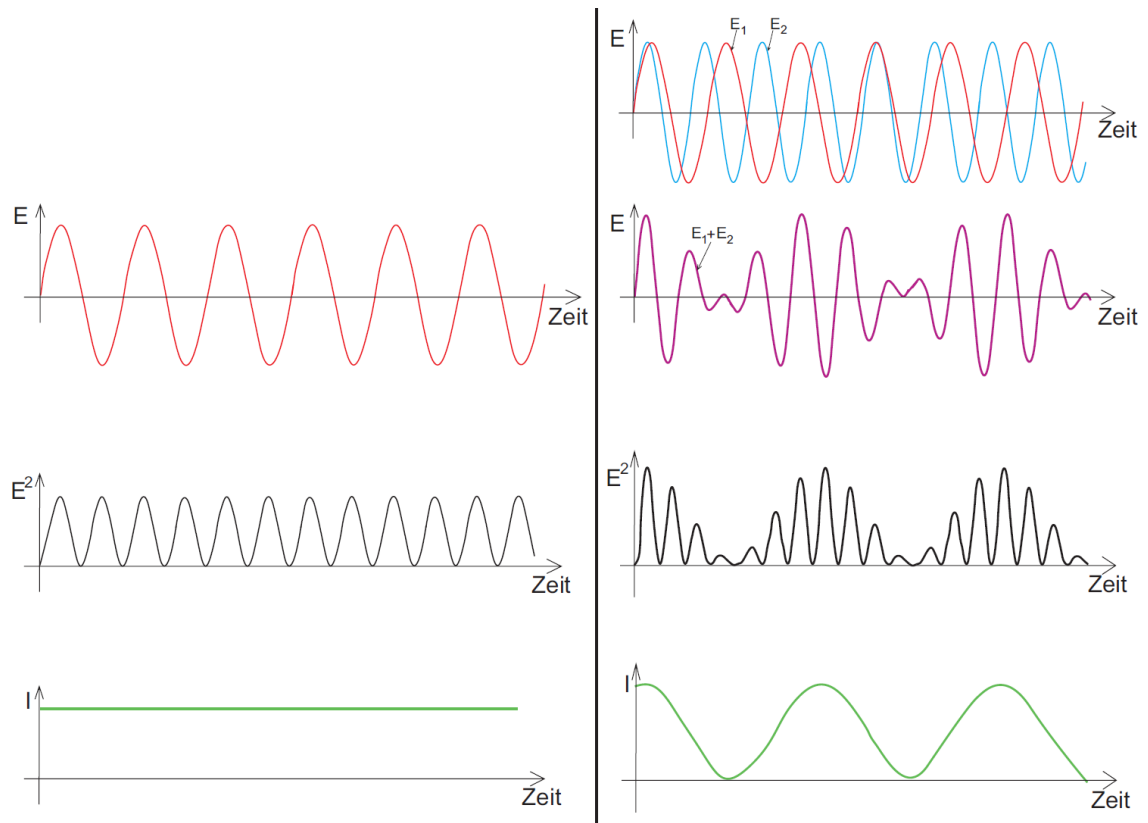


Abbildung 4.27: Die elektrische Feldstärke von Licht, deren Quadrat und die Intensität. links: Licht in einer Beugungsordnung, rechts: Die Überlagerung zweier Ordnungen.

Der Abstand der Interferenzmaxima auf dem Schirm hängt von dem Winkel φ_n und dem Abstand des Schirmes vom Gitter ab, sodass gilt:

$$\tan \alpha_n = \frac{d_n}{L}. \quad (4.23)$$

Aus 4.22 und 4.23 ergibt sich die folgende Gleichung für den Abstand der Maxima:

$$d_n = \frac{n\lambda}{\Lambda} \cdot L. \quad (4.24)$$

Diese Gleichung ist dieselbe, wie bei der Herleitung mit der Wellenvorstellung (vgl. Gleichung 4.17).

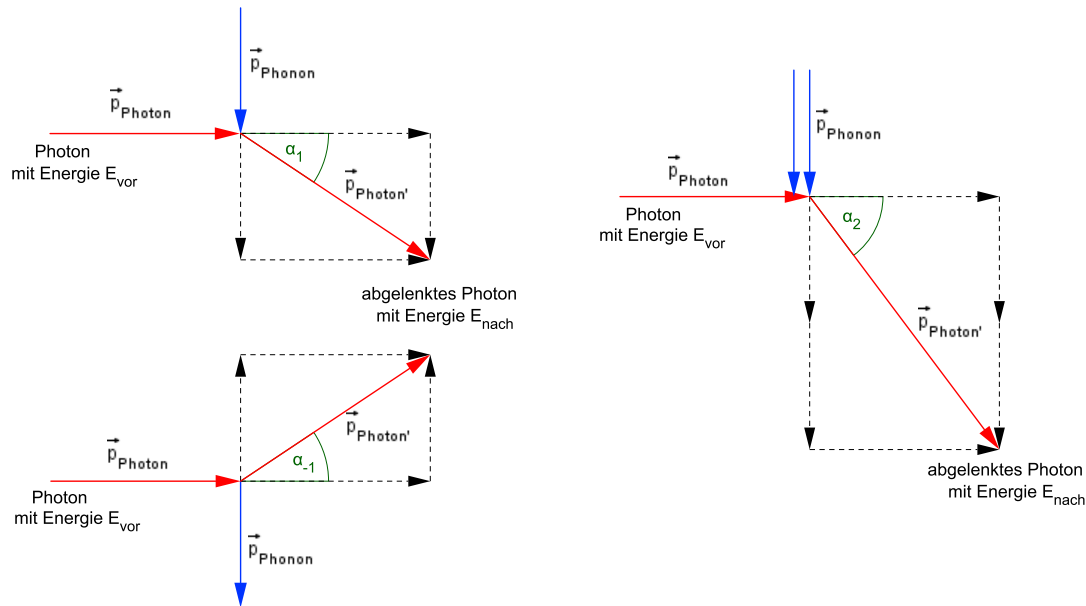


Abbildung 4.28: Schematische Darstellung des Impulserhaltungssatzes für Photonen. Es werden entweder Phononen vernichtet (oben links und rechts) oder erzeugt (unten links).

Laserlicht wird an einer Schallwelle gebeugt wie an einem Gitter mit der Wellenlänge Λ als Gitterkonstante.

In jeder Beugungsordnung hat das Licht eine andere Frequenz, die sich mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes errechnen lässt. Der Frequenzunterschied ist ein Vielfaches der Ultraschallfrequenz. Für die Frequenz der n -ten Ordnung gilt:

$$f_{L_n} = f_L \pm n f_S,$$

wobei f_{L_n} die Frequenz in der jeweiligen Beugungsordnung, f_L die Ursprungsfrequenz des Lichtes, n die Beugungsordnung und f_S die Frequenz der Ultraschallwelle ist.

Die Frequenzdifferenz lässt sich auf einem Oszilloskop direkt als Schwebungsfrequenz von zwei überlagerten Lichtstrahlen ablesen.

4.4.2 Experimente zum akusto-optischen Effekt

Sowohl die Beugung als auch die Frequenzänderung des Lasers kann mit diesem Experiment sichtbar gemacht werden. Außerdem kann mit Hilfe der Beugung die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen flüssigen Medien bestimmt werden.

Achtung, bei allen Versuchen mit dem Laser gilt:

- Schauen Sie nie in den Laser!!!
- Schalten Sie den Laser nur an, wenn er fest steht.

Materialien

Probenwannen mit unterschiedlichen Flüssigkeiten, Ultraschallsender, Laserdiode, Schirm mit Mikrometerschraube

Aufbau

Setzen Sie wie in Abb. 4.29 rechts den Ultraschallsender auf die Probenwanne der zu untersuchenden Flüssigkeit und platzieren Sie den Laser ($\lambda = 654nm$) in der Halterung an der Probenwanne. Stellen Sie den Schirm mindestens 1 m entfernt von der Probenwanne auf. Um den Laser zu justieren, wird die Ultraschallfrequenz auf $f = 9MHz$ gestellt. Mit den Schrauben am Deckel des Probenwanne lässt sich nun die Lage des Ultraschallsenders zum Laser so variieren, dass möglichst viele Beugungsordnungen auf dem Schirm zu sehen sind.

Durchführung

- Messen Sie die Abstände der 1. und 2. Beugungsordnung zur 0. Ordnung in Abhängigkeit der Ultraschallfrequenzen (von 3 MHz bis 9 MHz in 1MHz Schritten) mit Hilfe der Mikrometerschraube an der Rückseite des Schirmes.

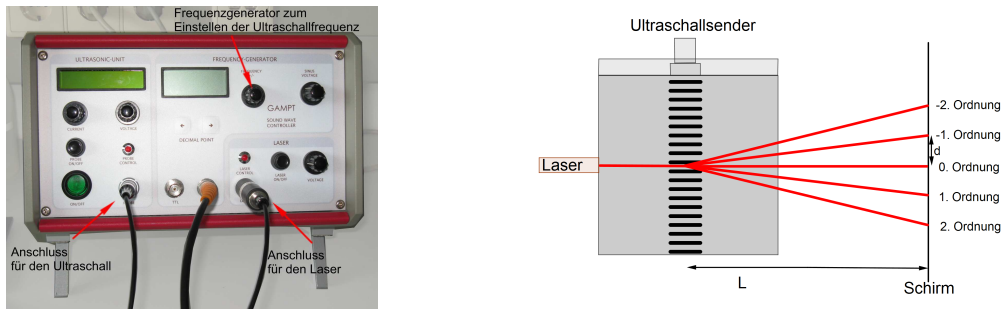


Abbildung 4.29: Aufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

- Stellen Sie die ermittelten Abstände in Abhängigkeit von der Frequenz jeweils für die unterschiedlichen Ordnungen grafisch dar. Ermitteln Sie mit Hilfe von Ausgleichskurven die Schallgeschwindigkeit in der jeweiligen Flüssigkeit. Das machen Sie, indem Sie die Steigung $m = \frac{\Delta d_n}{\Delta f}$ durch ein Steigungsdreieck ermitteln. Mit Gleichung 4.19 erhalten Sie dann die Schallgeschwindigkeit in der jeweiligen Flüssigkeit. (Die Referenzwerte der Schallgeschwindigkeit sind bei 21°C : $1483 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Wasser), $1220 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Spiritus, 94%), $1667 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Ethylglykol))
- Überlegen Sie sich, welche Fehler zu erwarten sind.

2. Bestimmung der Frequenzverschiebung des gebeugten Lichtes

Materialien

Probenwannen mit unterschiedlichen Flüssigkeiten und Schallabsorber, Ultraschallsender, Laserdiode, Strahlteiler, 2 verstellbare Spiegel, Photodiode, Oszilloskop, Schirm

Aufbau

Nutzen Sie zur Bestimmung der Frequenzverschiebung die Probenwanne mit dem Schallabsorber am Boden. Setzen Sie den Ultraschallsender auf die Probenwanne der zu untersuchenden Flüssigkeit und platzieren Sie den Laser ($\lambda = 654\text{nm}$) in der Halterung an der Probenwanne. Stellen Sie nun den Strahlteiler in den Strahlengang.

Stellen Sie wie in Abb.: 4.30 den Spiegel 1 so hinter den Strahlteiler in den Strahlengang und Spiegel 2 an die andere Seite des Strahlteilers, dass der an den Spiegeln reflektierte

Strahl durch den Strahlteiler hindurch mit dem am Strahlteiler reflektierten Strahl zusammenfällt. Stellen Sie dort zunächst einen Schirm auf, damit Sie als nächstes die Spiegel so justieren können, dass die Strahlen parallel sind. Die Spiegel sind nun so zu justieren, dass am Schirm die 0. Beugungsordnung vom dem Strahlengang der Spiegel mit der 1. Beugungsordnung des am Strahlteiler reflektierten Strahlengangs zusammenfällt.

Wenn das der Fall ist, stellen Sie statt des Schirmes die Photodiode in den Strahlengang und richten diese so aus, dass die 0. und 1. Beugungsordnung direkt hineingehen. Verbinden Sie die Photodiode mit dem Oszilloskop.

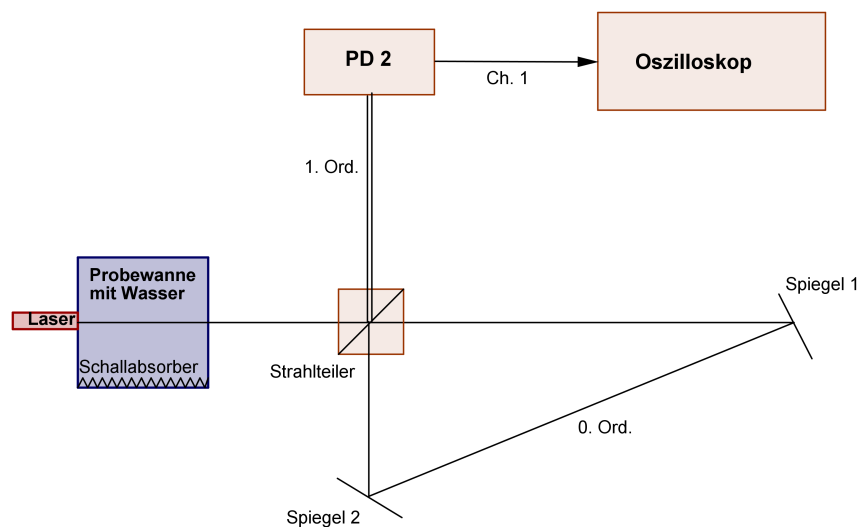


Abbildung 4.30: Aufbau zur Bestimmung der Frequenzverschiebung des Lichtes

Durchführung

- Bestimmen Sie mit Hilfe der auf dem Oszilloskop auftauchenden Schwebung die Frequenzdifferenz zwischen der 0. und 1. Ordnung!
- Erklären Sie warum die Strahlen genau parallel sein müssen!

4.5 Historische Anmerkungen

Seit dem 17. Jahrhundert haben Forscher versucht zu ergründen, ob Licht Wellen- oder Teilcheneigenschaften besitzt. Damals sprach man allerdings nicht von Teilchen, sondern von Korpuskeln. Descartes und Newton glaubten an die Korpuskeltheorie und erklärten mit Hilfe dieser Theorie Phänomene wie Reflektion und Brechung. Huygens und Fresnel dagegen argumentierten aufgrund ihrer Beugungs- und Interferenzversuche für die Wellennatur des Lichtes. Nachdem Heinrich Hertz 1887/88 die Vermutung von Maxwell, dass es elektromagnetische Wellen geben muss, bestätigte, indem er sie entdeckte, war es eindeutig, dass sich Licht als Welle ausbreitet.

Nachdem der lichtelektrische Effekt (Photoeffekt) von Hallwachs und der Compton-Effekt beobachtet und analysiert wurden, war klar, dass Licht nicht durch nur eine der beiden klassischen Theorien beschrieben werden kann. Auch die Erklärung des Spektrums von „schwarzen Strahlern“ bereitete mit der klassischen Theorie Schwierigkeiten. 1900 erkannte Max Planck, dass ein strahlendes System die Energie nur in ganzzahligen Vielfachen des Energiequantums hf austauschen kann. Dabei ist f die Frequenz der Strahlung und h das Plancksche Wirkungsquant:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad \text{Plancksches Wirkungsquant.}$$

Einstein nahm dann an, dass Licht aus Quanten der Energie hf besteht.

Bohr entwickelte 1913 eine Atomtheorie, die auf den Ansätzen von Rutherford basierten. Bohr versuchte darin das Atommodell mit der Quantenhypothese zu verbinden. Er behauptete, dass die Elektronen im Atom nur auf bestimmten Bahnen den Kern umlaufen und dabei keine Energie abstrahlen (im Gegensatz zu den Gesetzen der Elektrodynamik). Das Atom strahlt demnach nur Energie ab, wenn ein Elektron von einer Bahn zur nächsten springt.

Nachdem festgestellt wurde, dass Licht auch Teilcheneigenschaften besitzen muss ging De Broglie diesen Gedanken noch weiter nach. Er überlegte sich, dass wenn Licht Teilcheneigenschaften zugeschrieben werden können, andersherum auch bei Elektronen und Atomen Welleneigenschaften vorliegen könnten. Dies wurde aber erst 1927 in einem Versuch bestätigt. Der Welle - Teilchen - Dualismus wurde erst 1928/29 von Dirac, Heisenberg und Pauli im Rahmen der Entwicklung der Quantenmechanik vollständig gelöst.

Mit Hilfe der Quantenelektrodynamik konnte dann Licht auch so beschrieben werden, dass es beide Eigenschaften, die der Welle und die von Teilchen, besitzen kann (vgl. (Weber, 1990, S. 765)). Nach der Beschreibung der Quantenphysik stellt sich die Frage, was von der klassischen Physik noch bleibt. Die Gesetze der klassischen Physik können weiterhin für die meisten Phänomene, denen man tagtäglich konfrontiert wird, genutzt werden. Die Geschwindigkeiten von makroskopischen Körpern ist relativ klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit, daher reicht die Newtonsche Mechanik völlig aus (vgl. (Simonyi, 2001, S. 435-469)).

5 Fazit

Das Skript wurde in mehreren Bereichen verändert. Zunächst wurden aufgrund der Länge und Komplexität des alten Skriptes einige physikalische Inhalte weggelassen, da sie zum Verständnis der Versuche nicht notwendig sind und das Schulniveau überschreiten. Daneben sind einige physikalische Grundlagen hinzugefügt worden, um für die Experimente konkrete Fragestellungen anbieten zu können.

Die wichtigsten Änderungen sind die Entfernung der Inhalte: elektrisches Pumpen, Moden, Änderungsfunktionen der Verstärkungs- und Schwellbedingung, Stabilitätsbedingung und Resonatortypen. Diese Inhalte tragen nicht zum grundsätzlichen Verständnis der Versuche bei, sondern erschweren dieses und vergrößern den Umfang des Skriptes unnötig.

Außerdem wurde die Erklärung des akustooptischen Effekts mit Hilfe des Dopplereffekts entfernt und stattdessen durch die Erklärung mit Hilfe der Teilchenvorstellung ersetzt. Dies wurde gemacht, da die Schüler durch die Dopplereffekt Herleitung unnötig verwirrt werden können und die Erklärung im Teilchenbild dagegen sehr einfach und gut nachvollziehbar ist.

Des Weiteren wurden zum Bereich „Kohärenz“ Formeln hinzugefügt, damit die Schüler bei den Interferometerversuchen auch die Kohärenzlänge und die Frequenzbreite des Lichtes bestimmen können. Auch das genauere Ausführen der Inhalte „Laserschwelle“ und „Polarisation“ ermöglichen weitere Aufgabenstellungen.

Die Inhalte wurden sehr ausführlich dargestellt und durch für die Versuche notwendige Formeln ergänzt. Durch die kleinschrittigen Umformungen der nötigen Formeln sind diese leichter nachzuvollziehen. Um die Inhalte den Schülern verständlicher zu machen, wird der Text über die physikalischen Inhalte zusätzlich durch viele Bilder unterstützt.

Das alte Skript bestand bisher nur aus theoretischen Grundlagen der einzelnen Phänomene. Neu ist jetzt eine konkrete Versuchsanleitung, sodass die Schüler schon beim Lesen des Skriptes wissen, was untersucht werden soll. Beim Laserversuch soll neben dem Aufbau des Lasers zusätzlich die Laserschwelle bestimmt werden. Beim Interferometerversuch kann neben der Justage der beiden Interferometer und der Bestimmung der

Kohärenzlänge zusätzlich die Wellenlänge des Lichtes ermittelt werden. Mit dem akustooptischen Modulator kann die Frequenzänderung und durch die Beugung auch die Schallfrequenz in verschiedenen Medien bestimmt werden.

Am Ende eines jeden Kapitels werden alle für die Versuche wichtigen Informationen, in einem Kasten kurz dargestellt, damit die Schüler alle für die Versuche relevanten Formeln kurz gebündelt wiederfinden.

Ob die Verfassung des neuen Skriptes den gewünschten Erfolg bringt, dass die Schüler das Skript tatsächlich lesen und verstehen, kann erst mit der Evaluation der nächsten Durchführung des Programmes ermittelt werden. Das Programm „Light and Schools“ soll auf weitere Schulen und auch auf die Mittelstufe ausgeweitet werden. Für die Oberstufe ist außerdem in der Weiterentwicklung schon ein weiterer Versuch entstanden, der die Interferenzerscheinung von Einzelphotonen am Doppelspalt untersucht. Durch die Erarbeitung neuer Versuche soll eine individuelle Anpassung des Praktikums an die jeweiligen Klassen ermöglicht werden.

Literaturverzeichnis

- [Dähnhardt 2005] DÄHNHARDT, Dr. D.: *Genlabor und Schule*. LeLa GBM, 2005
- [Demtröder 2007] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Laserspektroskopie*. Springer, 2007
- [Diehl 2008] DIEHL, Bardo: *Physik Oberstufe Gesamtband*. Cornelsen, 2008
- [Eichler 1974] EICHLER, Hans J.: *Bergmann Schaefer Optik Band 3*. de Gruyter, 1974
- [Eichler 2006] EICHLER, Hans J.: *Laser Bauformen Strahlführung Anwendungen*. Springer, 2006
- [Gobrecht 1990] GOBRECHT, Heinrich: *Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 1*. de Gruyter, 1990
- [Graf 2009] GRAF, Thomas: *Laser in der Fertigung*. Vieweg und Teubner, 2009
- [Grehn 2007] GREHN, Joachim: *Physik*. Metzler, 2007
- [Haupt 2008] HAUPT, Dr. O.: *Schülerlabore in Deutschland - eine Erfolgsgeschichte!* IPN, 2008
- [Hellmig 2009] HELLMIG, Ortwin: *Ausgewählte Themen der Optik*. Institut für Laserphysik, 2009
- [Hillebrand 2005] HILLEBRAND, Dirk: *Forschend lernen - Schülerlabore in Deutschland*. Theo Prax, 2005
- [Höttecke 2001] HÖTTECKE, Dietmar: *Die Vorstellung von Schülern und Schülerinnen von der Natur der Naturwissenschaften*. Logos-Verlag, 2001
- [Höttecke 2007] HÖTTECKE, Dietmar: *Kompetenzen, kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung*. LIT Verlag Münster, 2007
- [Kircher 2007] KIRCHER, Ernst: *Physikdidaktik Theorie und Praxis*. Springer, 2007
- [Kneubühl 2008] KNEUBÜHL, Fritz K.: *Laser*. Vieweg Teubner, 2008
- [Lechte 2008] LECHTE, Mari-Annukka: *Sinnesbezüge, Interesse und Physik*. Barbara Budrich, 2008

- [Mikelskis 2006] MIKELSKIS, Helmut F.: *Physikdidaktik Praxishandbuch für die Sek I und II*. Cornelsen, 2006
- [Müller 2003] MÜLLER, Rainer: *Quantenphysik in der Schule*. Logos Verlag Berlin, 2003
- [Oomen-Welke 1988] OOMEN-WELKE, Ingelore: *Schüler: Persönlichkeit und Lernverhalten*. Gunter Narr Verlag Tübingen, 1988
- [Renz 2005] RENZ, Werner: *Förderung der Motivation und der Selbständigkeit im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht*. Freie und Hansestadt Hamburg für Bildung und Sport, 2005
- [Renz 2009] RENZ, Werner: *Rahmenplan Physik, Bildungsplan gymnasiale Oberstufe*. 2009
- [Schott 2008] SCHOTT, Walter: *Optische Messtechnik*. www.photonik.de Webcode 3008, 2008
- [Simonyi 2001] SIMONYI, K.: *Kultur Geschichte der Physik, Von den Anfängen bis heute*. Harri Deutsch, 2001
- [Weber 1990] WEBER, Horst: *Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3*. de Gruyter, 1990

Eidesstattlicheerklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe verfasst und mich dabei anderer als der angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe.

Ich bin mit einer späteren Ausleihe der Arbeit nicht einverstanden.

Hamburg, den 20.07.2010 (Verena Rau)