

**Experiment und Unterrichtsreihe Holografie
zur Leistungsbeurteilung in der
Sekundarstufe II**

**Staatsexamensarbeit im Fachbereich Physik
Johannes Gutenberg - Universität Mainz**

**von
Kerstin Grieger**

**Gutachter:
PD Dr. Klaus Wendt
PD Dr. Thomas Trefzger**

Mainz, den 25. Februar 2007

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Theorie - Holografie und Leistungsbeurteilung	3
2.1 Theoretische Grundlagen zur Holografie	3
2.1.1 Geschichte der Holografie	4
2.1.2 Räumliches Sehen und stereoskopische Bilder	8
2.1.3 Wellenfront eines Gegenstandes	10
2.1.4 Speicherungsprinzip der Holografie	12
2.1.5 Rekonstruktion der Hologramme	15
2.1.6 Verblüffende Effekte	17
2.1.7 Anwendungen der Holografie	20
2.2 Technische Grundlagen zur Holografie	25
2.2.1 Speichermedium Holografieplatte	25
2.2.2 Entwicklung der Hologramme	27
2.2.3 Anordnungen zur Aufnahme von Hologrammen	29
2.3 Fachdidaktische Grundlagen zur Leistungsbeurteilung von Experimenten	35
2.3.1 Nutzen der Experimente zur Leistungsbeurteilung	35
2.3.2 Anforderungen an die Experimente	37
2.3.3 Ablauf und Organisationsformen	38
2.3.4 Eignung des Versuchs Holografie zur Leistungsbeurteilung	41
3 Holografieaufbau für die Schule	49
3.1 Komerzielle Holografieaufbauten	50
3.2 Schulaufbau	51
3.3 Vorbereitung der Schülergruppenversuche	54
4 Praxis - Holografie in der Schule	57
4.1 Konzeption und Materialien	57
4.1.1 Konzept der Unterrichtsreihe und der Leistungsbeurteilung	58
4.1.2 Inhalte der Unterrichtsreihe für den Grundkurs	58
4.1.3 Inhalte der Unterrichtsreihe für den Leistungskurs	63
4.1.4 Arbeitsblätter zur Leistungsbeurteilung	63

4.1.5	Bewertungsbogen zur Beurteilung der psychomotorischen und sozialen Leistungen	66
4.2	Reflektion der durchgeführten Unterrichtsreihe	68
4.2.1	Reflektion der Leistungsbeurteilung	68
4.2.2	Reflektion der Ergebnisse der Leistungsbeurteilung	72
5	Rück- und Ausblick	75
	Literaturverzeichnis	77
A	Anhang	81
A.1	Allgemeines	81
A.2	Kopiervorlagen für die Schule	89
A.2.1	Materialien für den Unterricht	89
A.2.2	Materialien zur Leistungsbeurteilung	119
A.2.3	Anwendungen der Holografie	157
A.3	Ergebnisse der Unterrichtsreihe	159
B	Dankeschön!!!	177
C	Erklärung	179

Abbildungsverzeichnis

1.1	Holografie in der Schule	2
2.1	Dennis Gabor, der Vater der Holografie	4
2.2	Holografieaufbau von Gabor	4
2.3	Objekt und zugehöriges Hologramm von Gabor	5
2.4	Überlagerung des virtuellen und des reellen Bildes	6
2.5	Off - Axis Aufbau von Leith und Upatnieks	7
2.6	Strahlengang des Holografieaufbaus von Yuri Denisyuk	8
2.7	rot/cyan Brille	9
2.8	rot/cyan Bilder	10
2.9	Diffuse Reflektion	10
2.10	Modellauto hinter der Glasscheibe	11
2.11	Reflektierte Objektwelle	11
2.12	Fotografien eines Hologramms	12
2.13	Braggbedingung für Reflektionshologramme	18
2.14	Interferometrisches Hologramm	20
2.15	Personalausweis	21
2.16	Digitale holografische Gesichtsvermessung	22
2.17	Intensitätsstreifen in der Holografieplatte	26
2.18	Entwicklung der Holografieplatte	27
2.19	Entwickeltes Hologramm	28
2.20	Zweistrahl - Transmissionsaufbau	29
2.21	Laserstrahl mit und ohne Raumfilter	30
2.22	Raumfilter	30
2.23	Zweistrahl - Reflektionsaufbau	31
2.24	Ausrichtung der Interferenzstreifen bei verschiedenen Aufbauten	33
2.25	Reflektionsaufbau nach Denisyuk	34
2.26	Pflichtbaustein Wellenoptik II	42
2.27	Einbettung in den Lehrplan des Leistungskurses	43
2.28	Pflichtbaustein Wellenoptik	44
2.29	Einbettung in den Lehrplan des Grundkurses	45
2.30	Publikumsmagnet Holografie	48
3.1	Holografieaufbau aus Haushaltsgegenständen	50
3.2	Diode des HoloKits	51

3.3	Schulbau zur Holografie	52
3.4	Fixierung der Laserdiode	53
3.5	Justierung des Objekts	53
3.6	Wasserbecken	54
3.7	Türschleuse für die Schule	55
4.1	Schüler mit rot/cyan Brille	59
4.2	Auto hinter der Glasscheibe	60
4.3	Schüler vergleichen stereoskopische Bilder und Hologramme	61
4.4	Schüler planen einen Holografieaufbau	62
4.5	Aufbau der Versuche	68
4.6	Schüler bearbeiten den Test	69
4.7	Stationen zur Leistungsbeurteilung	72

1 Einleitung

Im Jahr 2001 wurde das Projekt „**PeP** - **Physik** erfahren im Forschungs-**Praktikum**“ ins Leben gerufen, wobei mehrere Arbeitsgruppen des Instituts für Physik der Johannes Gutenberg - Universität Mainz Schülerprojekttage zu unterschiedlichen Themen anboten. In der Arbeitsgruppe Larissa wurde im Rahmen der Staatsexamensarbeit von Oliver Puscher das PeP „Vom Kerzenlicht zum Laser“ entwickelt und mehrfach durchgeführt. Darauf aufbauend ist es zur Tradition der Arbeitsgruppe geworden, regelmäßig ganze Klassen und Oberstufenkurse aber auch einzelne Schüler für ein oder zwei Tage bzw. eine ganze Woche im Praktikum zu betreuen. Die entsprechenden Projekte sind dabei gegenwärtig hauptsächlich für die Oberstufe ausgelegt; im Rahmen der Staatsexamensarbeit von Daniel Klein wurde aber auch ein sogenanntes „Mittelstufen - PeP“ entwickelt.

Als Oberstufenschülerin habe ich bei der Teilnahme des PeP „Vom Kerzenlicht zum Laser“ im Frühjahr 2002 die Holografie als einen der faszinierendsten Versuche der ganzen Projektwoche erlebt. Nachdem ich in Mainz mein Physikstudium begonnen hatte und Oliver Puscher in den Schuldienst gegangen war, bekam ich die Gelegenheit, das Projekt Holografie zunächst in seiner bestehenden Form weiter zu führen. Im Laufe des Studiums und nicht zuletzt durch den Besuch der Arbeitsgruppe um Dozent Dr. Pedro Pombo am Departamento de Física der Universidade de Aveiro in Portugal erhielt ich immer mehr Einblick in das Gebiet der Holografie, in die Vielzahl von Holografietypen, deren unterschiedliche Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Das Projekt wurde immer eigenständiger und der Messestand „Faszination Holografie - Wir bringen das Labor in die Stadt!“, der am Wissenschaftsmarkt 2005 von der Arbeitsgruppe Quantum/Larissa beigesteuert wurde, war ein voller Erfolg. Die Idee war geboren, aus dem Einsatz der Holografie in der Physikdidaktik eine eigenständige Staatsexamensarbeit zu entwickeln.

Im Rahmen der Schülerpraktika PeP „Vom Kerzenlicht zum Laser“ wurde die Holografie als eins von vielen Experimenten eingesetzt, um die Schüler für die Physik zu begeistern. In dieser Staatsexamensarbeit soll nun die Holografie einen anderen Stellenwert erhalten, indem sie ihren Weg aus der Universität in die Schule finden soll. Dabei ist vorgesehen die Holografie dort nicht nur als Projekt oder als AG, wie etwa das von der Universidade de Aveiro aufgebaute, über ganz Portugal ausgedehnte „HoloNet“ (Holografienetzwerk), einzusetzen. Vielmehr soll die Holografie in den regulären Physikunterricht eingebunden werden. Dies stellt ganz neue Anforderungen: während bisher die Holografie in der Arbeitsgruppe „nur“ erfolgreich zum Wecken von Interesse

für die Physik genutzt wurde, soll sie nun dazu verwendet werden, um Physik zu lehren.

Für einen Einsatz im regulären Schulunterricht ist es dabei sinnvoll und erforderlich, dass das an dem Versuch gelehrt und gelernte Wissen abgeprüft werden kann. Damit wird sichergestellt, dass es von den Schülern nicht als Sonderprojekt angesehen wird, dass „ja sowieso nicht benotet wird und daher nicht wichtig ist“. Es wird dadurch zu einem normalen Unterrichtsgebiet, welches den gleichen Stellenwert wie jeder andere Bereich aus dem Unterricht hat. Dieses an allen Schulen bekannte Problem des hohen Interesses an, aber gleichzeitiger niedriger Wertschätzung von Experimenten seitens der Schüler, lässt sich dabei durch die Einbindung von Experimenten in die Leistungsbeurteilung beheben. Die Holografie eignet sich gut als ein solches Experiment zur Leistungsbeurteilung, da sie umfangreiche und wichtige Inhalte der Optik zum Verständnis voraussetzt und daher vermitteln kann. Bei der Entwicklung der Unterrichtsreihe wurde besonderen Wert darauf gelegt, dass das Konzept von Lehrkräften der Sekundarstufe II übernommen und durchgeführt werden kann; dies schließt auch einen eigens dafür entwickelten Holografie - Schulaufbau mit ein.



Abbildung 1.1: Holografie in der Schule

Die vorliegende Arbeit ist in vier Kapitel gegliedert. Zunächst werden die für die Durchführung in der Schule nötigen theoretischen Grundlagen zur Holografie sowie didaktische Grundlagen zur Leistungsbeurteilung an Experimenten in Kap. 2 vorgestellt. Darauf aufbauend und um diesen Text nicht nur theoretischen Vorarbeiten zu widmen, wurde im Rahmen der Staatsexamensarbeit auch eine Unterrichtsreihe konzipiert und an einem Gymnasium sowohl im Grundkurs Physik als auch in einem Leistungskurs Physik erprobt (Abb. 1.1). Die Umsetzung wird im Kapitel 4 „Holografie in der Schule“ erläutert. Die Arbeit endet mit einem Rück- und Ausblick (Kap. 5). Sie enthält zusätzlich einen umfangreichen Anhang, der unter anderem Kopiervorlagen für den Gebrauch im Unterricht bietet. Die Staatsexamensarbeit und die Kopiervorlagen werden außerdem im PDF-Format zum freien Download auf der Homepage der Arbeitsgruppe Larissa und der Lehramtsseite des Instituts für Physik zur Verfügung gestellt.

2 Theorie - Holografie und Leistungsbeurteilung

2.1 Theoretische Grundlagen zur Holografie

Die Geburtsstunde der Holografie lässt sich auf das Jahr 1947 datieren. Seit dieser Zeit hat sie eine recht verzweigte und sprunghafte Entwicklung durchlaufen. In diesem Kapitel wird zunächst ein Einblick in die wichtigsten Etappen ihrer Entwicklung von den ersten prinzipiellen Versuchen durch Dennis Gabor im Jahr 1947 bis zur Herstellung der ersten Reflektionshologramme von Yuri Denisjuk im Jahr 1962 gegeben. Danach behandelt Kapitel 2.1.2 das zweiäugige Sehen, welches eine Grundlage des räumlichen Sehens und damit die Basis zum Verständnis der Holografie darstellt. Desweiteren wird in diesem Kapitel das Prinzip stereoskopischer Bilder vorgestellt. Diese nutzen die Leistung unseres Gehirns beim räumlichen Sehen aus, um einen dreidimensionalen Eindruck zu bewirken. Um das besondere Speicherungsprinzip der Holografie anschaulicher darstellen zu können, wird in Kap. 2.1.3 zunächst näher auf die zu speichernde Wellenfront des Objektes eingegangen. Das Kapitel 2.1.4 behandelt dann das Speicherungsprinzip der vollständigen Wellenfront. Mit der Rekonstruktion der Hologramme und des damit verbundenden dreidimensionalen Eindrucks beschäftigt sich das darauf folgende Kapitel, in dem auch die Rekonstruktion mathematisch beschrieben wird. Abschließend werden zwei verblüffende Effekte, die bei Reflektionshologrammen auftreten (Kap. 2.1.6) und eine Auswahl von Anwendungen der Holografie (Kap. 2.1.7) vorgestellt. Diese sollen dem Anspruch einer möglichst großen Vielfalt bei gleichzeitiger Aktualität und Einsetzbarkeit im Unterricht aus unterschiedlichen Gründen genügen. Während die verschiedenen Anwendungen in diesem Kapitel präsentiert und erläutert werden, werden die Gründe für ihre Auswahl im Hinblick auf die Schule in Kap. 4 aufgezeigt.

2.1.1 Geschichte der Holografie

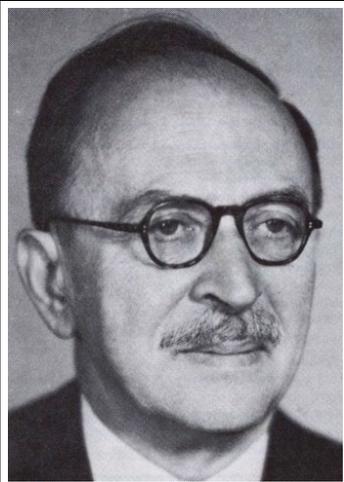


Abbildung 2.1: Dennis Gabor, der Vater der Holografie; aus [Hei95]

Abbildung 2.1 zeigt den ungarischen Physiker Dennis Gabor. Er entwickelte die Holografie und gab ihr diesen Namen, weshalb er oft als „Vater der Holografie“ bezeichnet wird. Das Wort Holografie setzt sich aus den griechischen Worten „holos“ (ganzheitlich, vollständig) und „graphein“ (aufschreiben, aufzeichnen) zusammen. Holografie bedeutet also vollständiges Aufzeichnen. Der gewählte Name ist sehr treffend, da dessen Wortbedeutung genau wiedergibt, was mit dieser Technik möglich ist: Eine vollständige Aufzeichnung der reflektierten Wellenfront eines Gegenstandes. Gabor entdeckte 1947 das Prinzip der Holografie zufällig, während er an der Verbesserung des Auflösungsvermögens eines Elektronenmikroskops arbeitete. Hierzu baute er zunächst ein Lichtmikroskop auf, welches dem Aufbau des Elektronenmikroskops entsprach. Gabor konnte zeigen, dass die Phasenbeziehung der Elementarwellen innerhalb der Objektwelle durch Überlagerung mit einer Referenzwelle fotografisch festgehalten werden kann. Zudem erkannte er als erster, dass dieses Verfahren nicht nur zur Mikro-

skopie, sondern auch zur Konstruktion dreidimensionaler Abbildungen genutzt werden kann [Hei95]. „Für seine Erfindung und Entwicklung der holographischen Methode“ [Pop06] wurde ihm 1971 der Nobelpreis verliehen. Abbildung 2.2 zeigt seinen Aufbau, der im Folgenden näher erläutert wird.

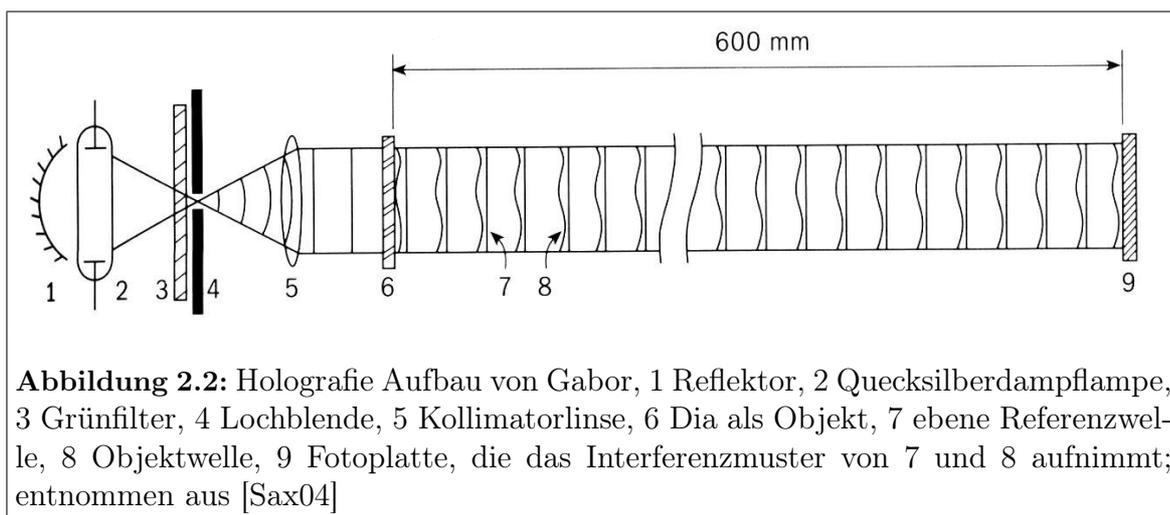
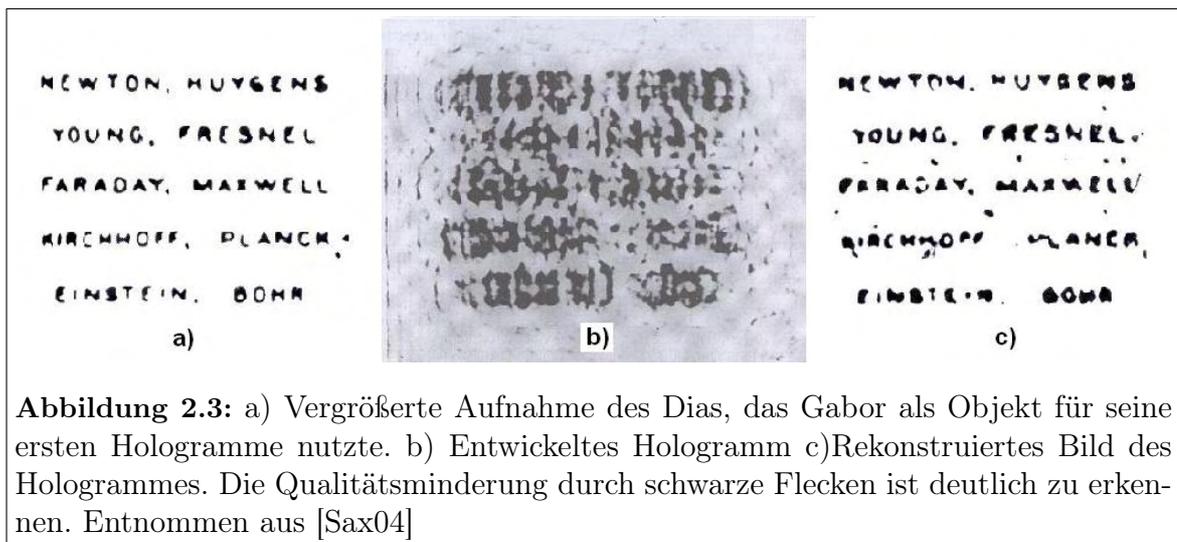


Abbildung 2.2: Holografie Aufbau von Gabor, 1 Reflektor, 2 Quecksilberdampfampe, 3 Grünfilter, 4 Lochblende, 5 Kollimatorlinse, 6 Dia als Objekt, 7 ebene Referenzwelle, 8 Objektwelle, 9 Fotoplatte, die das Interferenzmuster von 7 und 8 aufnimmt; entnommen aus [Sax04]

Gabor hatte noch keine Laser zur Verfügung und nutzte daher in seinem Aufbau eine Quecksilberdampfampe (2) in Kombination mit einem Grünfilter (3). Um die Lichtin-

intensität, mit der das Objekt angestrahlt wird, zu erhöhen, befindet sich auf einer Seite der Lichtquelle ein Reflektor (1). Eine Lochblende (4) lässt nur einen kleinen Teil dieses Lichtes passieren, so dass es sich dahinter wie das Licht einer punktförmige Lichtquelle aufweitet. Die Kollimatorlinse (5) dient zur Bündelung dieses aufgeweiteten Strahls. Der Strahl trifft dann auf ein Objekt (6). Gabor nutzte als Objekt ein Dia, auf dem sich die Namen der bekannten Physiker Newton, Huygens, Young, Fresnel, Faraday, Maxwell, Kirchhoff, Planck, Einstein und Bohr befanden. In Abb. 2.3 a) ist eine vergrößerte Aufnahme dieses Dias zu sehen, das eine Seitenlänge von nur 1 mm besaß [Hei95]. Das durch das Objekt transmittierte Licht trägt, wie in Abb. 2.2 gezeigt, nun als Objektwelle die Information des Objektes (8). Diese Objektwelle trifft nach einer Strecke von 60 cm zusammen mit der vom Objekt unbeeinflussten transmittierten Referenzwelle (7) auf eine gewöhnliche Fotoplatte (9), die das Interferenzmuster von Objekt- und Referenzwelle speichert [Sax04]. Der relativ große Abstand von 60 cm ist bei der Verwendung von normalen Fotoplatten nötig, da das Interferenzmuster zu fein ist, um es direkt hinter dem Objekt aufzuzeichnen. Es entsteht ein Hologramm, das wegen des geradlinigen Aufbaus In-Line Hologramm oder aufgrund seines Entwicklers auch Gabor Hologramm genannt wird.



Bringt man das entwickelte Hologramm (Abb. 2.3 b)) wieder in den gleichen Strahlengang aber ohne Objekt, so entsteht das virtuelle Bild (Abb. 2.3 c)) an dessen Stelle. Dies ist in Abbildung 2.4 dargestellt: das kollimierte Licht der Quecksilberdampfampe (7) trifft bei der Rekonstruktion auf das entwickelte Hologramm (9). Es bildet sich die Wellenfront des virtuellen Bildes (10), das dem scheinbar an Position (6) sitzenden Objekts entspricht. Außerdem entsteht im Bereich der Wellenfront des virtuellen Bildes (10) die Wellenfront des reellen Bildes (11). Der Beobachter (12) sieht diese beiden Bilder überlagert. Die Qualität von Gabors Hologrammen war daher noch nicht

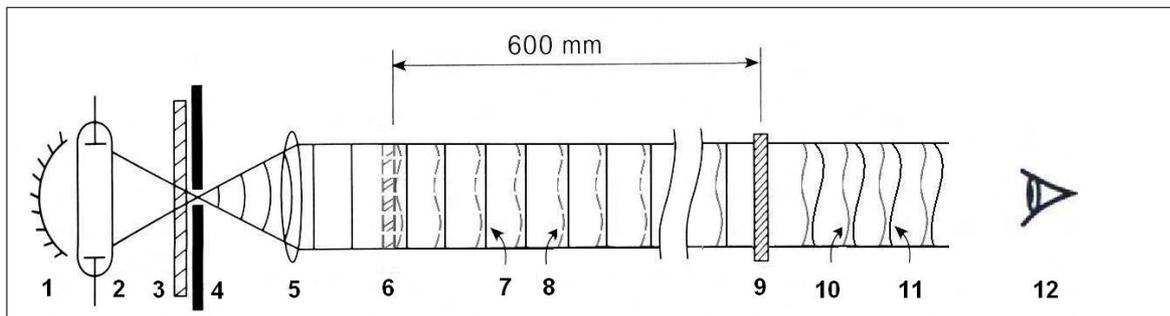


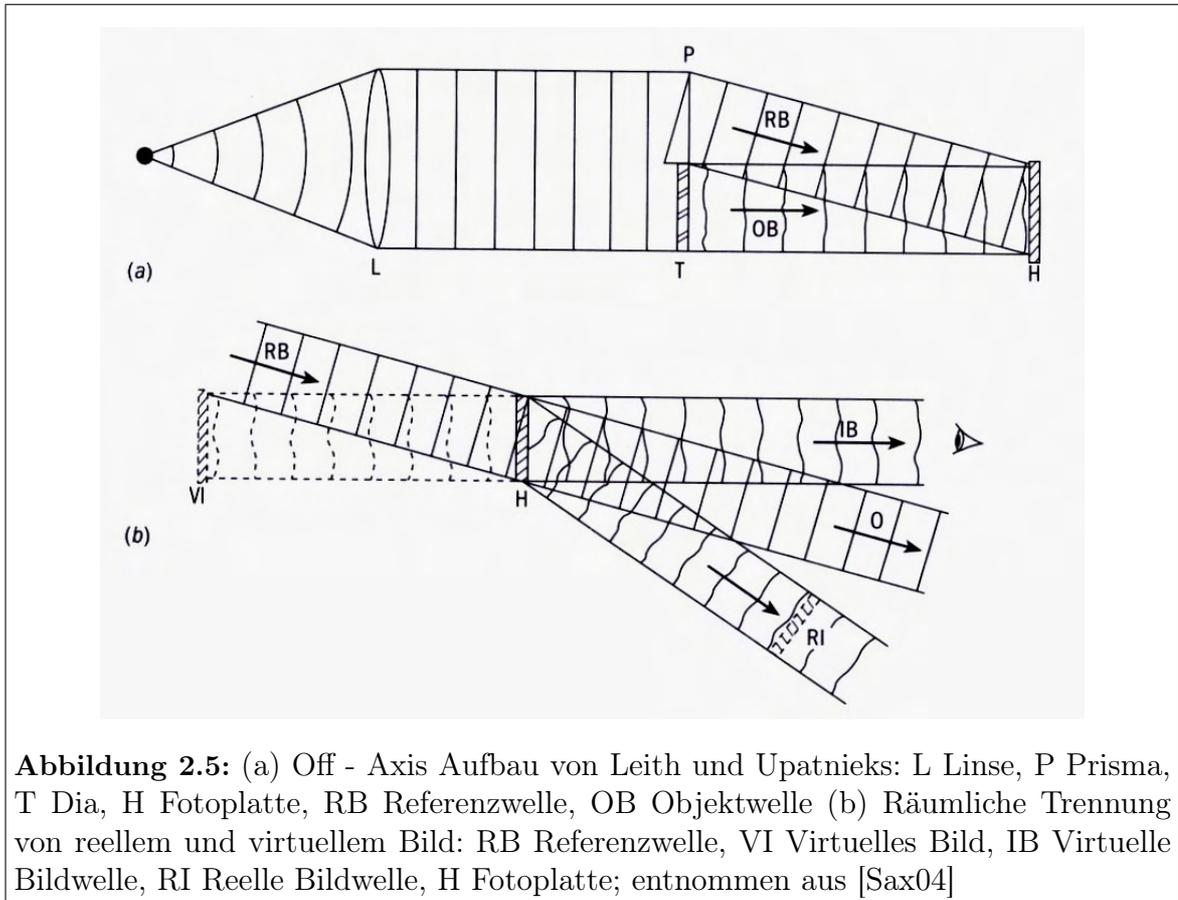
Abbildung 2.4: Überlagerung des virtuellen und des reellen Bildes, 1 Reflektor, 2 Quecksilberdampfampe, 3 Grünfilter, 4 Lochblende, 5 Kollimatorlinse, 6 Virtuelles Bild, 7 ebene Referenzwelle, 8 Virtuelle Wellenfront, 9 entwickelte Hologramm, 10 Wellenfront des virtuellen Bildes, 11 Wellenfront des reellen Bildes, 12 Beobachter; in Anlehnung an [Sax04]

befriedigend. Die Betrachtung des virtuellen Bildes wurde durch das zusätzlich entstehende reelle Bild gestört [Sax04]. Darüber hinaus zeigten die rekonstruierten Bilder der Hologramme schwarze Flecken, wie in der Abb. 2.3 c) deutlich zu sehen ist.

Die Überlagerung des virtuellen Bildes mit dem ungewollten realen Bild, die Gabor bei seinen In-Line Hologrammen erhielt, umgingen die beiden amerikanischen Wissenschaftler Emmett Leith und Juris Upatnieks, indem sie die Anordnung des Aufbaus in der in Abb. 2.5 gezeigten Weise abänderten.

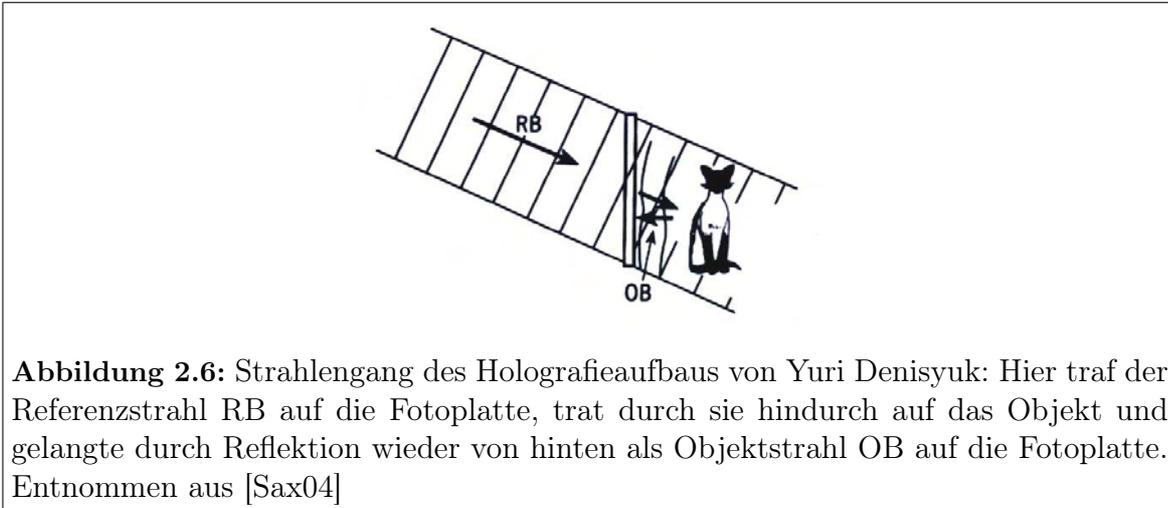
Ein aufgeweiteter Lichtstrahl trifft bei diesem Aufbau auf eine Linse L, die den Strahl zunächst kollimiert. Eine Hälfte des breiten Strahls transmittiert durch das Dia T und trifft dann als Objektstrahl OB geradlinig auf die Fotoplatte H. Das Prisma P lenkt den anderen Teil des einfallenden Strahls als Referenzstrahl RB um, so dass er sich auf der Platte mit dem Objektstrahl überlagert. Das Interferenzmuster der beiden Strahlen RB und OB wird dann auf der Fotoplatte H gespeichert [Sax04]. Die entstehenden Hologramme werden wegen des schrägen, also nicht axialen Einfalls des Referenzstrahls Off - Axis Hologramme genannt. Stellt man die entwickelte Fotoplatte wieder in den Aufbau (Abb. 2.5 (b)), so wird das virtuelle Bild VI durch den Referenzstrahl RB rekonstruiert.

Durch den schrägen Einfall des Referenzstrahls RB entsteht das reelle Bild RI deutlich außerhalb der Wellenfront des virtuellen Bildes IB, wie in Abb. 2.5 (b) gezeigt. Durch die Aufteilung des Laserstrahls in Objekt- und Referenzstrahl gelang es also, das reelle Bild in einen anderen Winkelbereich zu verschieben, so dass es das virtuelle Bild nicht mehr störte. Zusätzlich konnten Leith und Upatnieks als Lichtquelle Rubinlaser, die Anfang der sechziger Jahren gebaut wurden, anstelle der Quecksilberdampfampfen



nutzen. Dies war eine notwendige Voraussetzung dafür, erste dreidimensionale Hologramme zu erzeugen, wie in Kap. 2.1.4 näher erläutert werden soll. Dies gelang Ihnen 1963. Ihre Hologramme waren bereits von so guter Qualität, dass nach deren Vorstellung auf der Frühjahrstagung der Optical Society in Washington ein „ungeheurer Run auf das neue Forschungsgebiet“ einsetzte [Hei95].

Im gleichen Zeitraum (1962) gelang es dem sowjetischen Physiker Yuri Denisyuk, die ersten sogenannten Weißlichthologramme herzustellen, die auch mit weißem Licht betrachtet werden konnten. Dies wird in Kap. 2.1.5 und 2.1.6 näher erläutert. Wie in Abb. 2.6 gezeigt, trifft bei diesem Aufbau der Referenzstrahl RB auf die Fotoplatte, gelangt durch sie hindurch auf das Objekt und trifft durch Reflexion am Objekt wieder als Objektstrahl OB von hinten auf die Fotoplatte. Weißlichthologramme bedeuteten einen großen Fortschritt, da man nun nicht mehr auf eine monochromatische Lichtquelle angewiesen war, um die Hologramme anzuschauen oder auszulesen. Ein aktuelles Anwendungsbeispiel von Weißlichthologrammen wird in Kap. 2.1.7 vorgestellt.



2.1.2 Räumliches Sehen und stereoskopische Bilder

Die Fähigkeit des Menschen räumlich zu sehen, war schon bei der Entwicklung der Menschenaffen vor ca. 20 Mio. Jahren vorhanden. Die Menschenaffen sind mit ihren langen Armen bestens an das Leben im Regenwald angepasst, wo sie sich von Baum zu Baum hangeln. Voraussetzung für diese Fortbewegung ist ein gutes räumliches Sehvermögen [Pae06]. Dieses ist in der Entwicklung des Menschen bis heute nicht verloren gegangen.

In näherer Umgebung (weniger als 20 m) wird dieses räumliche Sehvermögen durch das zweiäugige Sehen ermöglicht¹. Die seitlich versetzte Stellung der nach vorne gerichteten Augen des Menschen führt dazu, dass sich die Gesichtsfelder beider Augen weitgehend überdecken. Mit dem Gesichtsfeld eines Auges ist dabei derjenige kegelförmige Ausschnitt eines Raumes gemeint, den man bei unveränderter Stellung des entsprechenden Auges sehen kann. Die Überdeckung der Gesichtsfelder führt dazu, dass Gegenstände, die sich im Gesichtsfeld beider Augen befinden, mit jedem Auge, jedoch leicht versetzt, gesehen werden. Schließt man das linke Auge, so sieht man mit dem rechten Auge den jeweiligen Gegenstand etwas weiter von rechts, mit dem linken Auge entsprechend etwas weiter von links. Unser Gehirn setzt diese beiden zweidimensionalen Bilder dann zu einem dreidimensionalen Bild zusammen [B⁺98].

Stereoskopische Bilder nutzen diese Fähigkeit des Gehirns aus, aus zwei zweidimensionalen Bildern ein dreidimensionales Bild abzuleiten. Die wohl bekannteste Variante

¹Das Gehirn nutzt neben dem zweiäugigen Sehen auch andere Anhaltspunkte, wie zum Beispiel die scheinbare Größe eines bekannten Gegenstandes. Doch diese anderen Anhaltspunkte besitzen gerade in näherer Umgebung eine geringere Bedeutung [C⁺91].

der stereoskopischen Bilder sind die rot/cyan Bilder². Diese Bilder bestehen aus zwei, um den Augenabstand versetzt aufgenommenen oder gezeichneten Bildern, die jeweils in einer anderen Farbe eingefärbt wurden. Das Bild, welches später das rechte Auge sehen soll, wird dabei cyan, das andere rot eingefärbt. Trägt man eine rot/cyan Brille (Abb. 2.7), sieht jedes Auge nur das für dieses Auge bestimmte Bild. Das Gehirn setzt dann aus den beiden zweidimensionalen Bildern ein dreidimensionales Bild zusammen.

Betrachtet man mit einer rot/cyan Brille die beiden in Abb. 2.8 gezeigten Elefanten, so erhält man einen dreidimensionalen Eindruck. Betrachtet man ein stereoskopisches Bild von der Seite, so fällt auf, dass man das abgebildete Motiv nicht von der Seite, sondern immer von vorne sieht [Sax04]. Dieses Phänomen kennt man von normalen zweidimensionalen Abbildungen und Fotografien. Betrachtet man ein Foto von der Seite, so sieht man das jeweilige Motiv nicht von



Abbildung 2.7: Trägt man eine rot/cyan Brille, so sieht jedes Auge ein anderes Bild. Aus [Ols05]

der Seite, sondern immer noch von vorne. Die einzige Veränderung besteht darin, dass entlang der Blickrichtung das Motiv verkürzt erscheint. Der Effekt der festen Sichtweise eines Motivs bei stereoskopischen Bildern lässt sich also leicht dadurch begründen, dass sie aus normalen zweidimensionalen Fotografien bzw. Zeichnungen bestehen, die immer von vorne gesehen werden. Der Effekt ist besonders leicht bei einfachen Motiven zu erkennen. Betrachtet man in Abb. 2.8 das rechte Bild einer Spirale aus verschiedenen Richtungen mit einer rot/cyan Brille, so wandert die Öffnung der Spirale mit. Aus jedem Blickwinkel zeigt die Öffnung der Spirale zum Betrachter.

Dies hat sowohl Vor- als auch Nachteile. Nutzt man die stereoskopische Technik um z.B. Kinofilme in 3D zu projizieren, so hat jeder Zuschauer im Kino bei einer Unterwasserszene den Eindruck, gleich von einem Hai gefressen zu werden oder aber die kleinen Seepferdchen direkt zum Greifen nahe vor sich zu sehen³. Beobachtet man die Zuschauer, so sieht man, dass sie, unabhängig davon wie weit entfernt sie von der Leinwand sitzen, vor sich zu den Seepferdchen greifen oder sich alle ähnlich stark vor dem Hai erschrecken. Kein Zuschauer kann sich sicherer fühlen als ein anderer, der an einer anderen Stelle im Kino sitzt. In diesen Kinos gibt es also keine schlechten Plätze.

Der Vorteil ist zugleich aber auch ein Nachteil: Möchte man eine 3D Aufnahme von einem Gegenstand erzeugen, um später den Gegenstand aus verschiedenen Perspektiven betrachten zu können, so sind stereoskopische Bilder gänzlich ungeeignet. Woran dies

²Cyan ist ein Blauton.

³Stereoskopische Kinofilme werden zum Beispiel im sogenannten 4D Kino (sehen, hören, fühlen, riechen) im Europa Park Rust angeboten.



Abbildung 2.8: Betrachtet man mit einer rot/cyan Brille die beiden Bilder, so erhält man einen dreidimensionalen Eindruck. Verändert man dabei seinen Blickwinkel, so wandert das Bild mit. Entnommen aus [Ols05]

liegt und welche Informationen gespeichert werden müssen, um eine vollständige 3D Aufnahme eines Gegenstandes zu erhalten, wird im Folgenden beschrieben.

2.1.3 Wellenfront eines Gegenstandes

Trifft Licht⁴ auf einen Gegenstand, so wird es in alle Richtungen diffus reflektiert. Dadurch können zwei Personen, die an verschiedenen Positionen stehen, gleichzeitig jeweils einen bestimmten - den Ihnen zugewandten - Teil der Oberfläche sehen. Bedenkt man jedoch das Reflektionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel), so müsste paralleles Licht auch parallel reflektiert werden. Zwei Personen könnten also nicht von verschiedenen Standpunkten aus den gleichen Teil eines Gegenstandes sehen. Dieser scheinbare Widerspruch zum Reflektionsgesetz lässt sich leicht aufklären. Dazu stellt man sich die raue Oberfläche eines Objektes aus vielen kleinen Spiegelflächen, die in verschiedene Richtungen stehen, zusammengesetzt vor. Treffen nun parallele Lichtstrahlen auf einen Teil des Objektes, so werden die Strahlen entsprechend dem Reflektionsgesetz reflektiert. Da die Lote der Spiegel aber in verschiedene Richtungen zeigen, werden die Strahlen in viele, letztendlich in alle

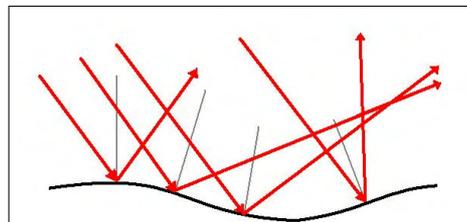


Abbildung 2.9: Die Oberfläche von realen Objekten ist rau, so dass einfallendes paralleles Licht diffus reflektiert wird.

⁴In diesem Kapitel wird immer davon ausgegangen, dass der betreffende Gegenstand von einer sich nicht bewegenden Lichtquelle, die paralleles Licht aussendet, beleuchtet wird.



Abbildung 2.10: Die Information „Hinterrad“ ist an mehreren Punkten der Platte zu sehen.

Richtungen reflektiert (Abb. 2.9).

Die diffuse Reflektion lässt sich veranschaulichen, indem man z.B. ein Modellauto hinter eine Glasscheibe setzt und es exemplarisch aus drei verschiedenen Richtungen betrachtet. Markiert man jedesmal diejenige Stelle auf der Glasscheibe, an der man z.B. das Hinterrad des Modells sieht (Abb. 2.10), so fällt auf, dass aufgrund der diffusen Reflektion die Information „Hinterrad“ an drei Punkten der Platte zu sehen ist. Würde man diesen Vorgang mit immer neuen Sichtwinkeln wiederholen, so wäre nach einer gewissen Zeit fast die ganze Platte markiert. Genauso verhält es sich mit der Windschutzscheibe des Autos und allen anderen Punkten seiner Oberfläche. Daraus folgt, dass jeder Punkt des Gegenstandes an jedem Punkt der Glasplatte für einen bestimmten Betrachtungswinkel zu sehen ist.

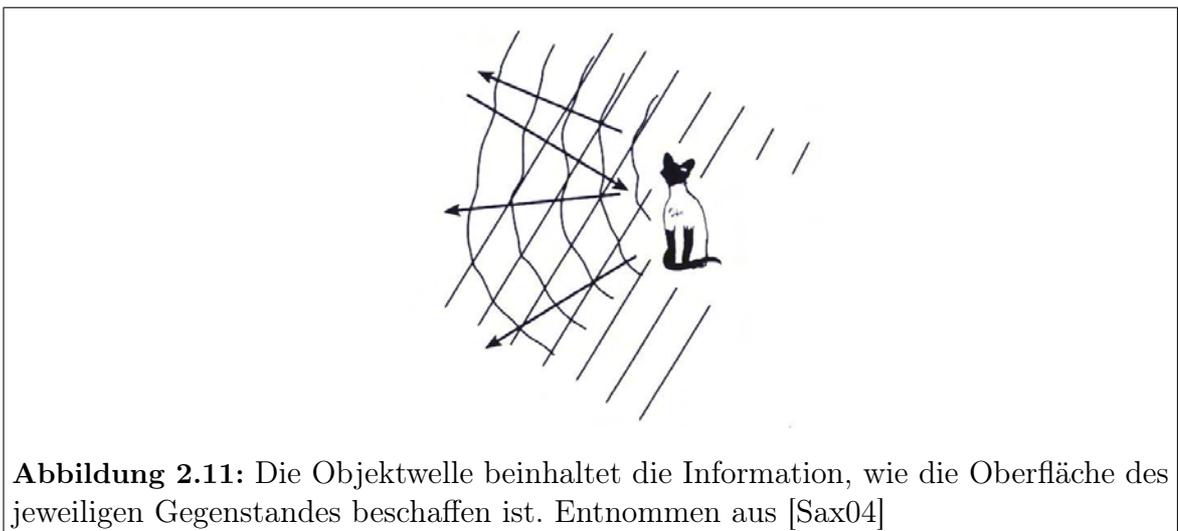


Abbildung 2.11: Die Objektwelle beinhaltet die Information, wie die Oberfläche des jeweiligen Gegenstandes beschaffen ist. Entnommen aus [Sax04]

Wechselt man vom Strahlenmodell der geometrischen Optik zum Wellenmodell des Lichts, so gilt nach dem Huygens'schen Prinzip, dass an jedem Punkt der Oberfläche eines Gegenstandes eine Elementarwelle reflektiert wird. Ist die genutzte Lichtquelle kohärent und monochromatisch, so entstehen an der Oberfläche des Gegenstandes Elementarwellen, die immer den gleichen Phasenbezug zueinander haben. Die Einhüllenden der Elementarwellen ergeben neue Wellenfronten, die sich in alle Richtungen ausbreiten. Die genaue Form dieser neuen Wellenfronten ist dabei abhängig von den Phasenbeziehungen der Elementarwellen untereinander und beinhaltet daher die Information über die Beschaffenheit der Oberfläche des jeweiligen Gegenstandes. Die Gesamtheit aller vom Objekt ausgehenden Wellenfronten werden daher mit „Objektwelle“ bezeichnet [Sax04, Hei95]. In Abbildung 2.11 ist dies dargestellt: eine von links oben einlaufende kohärente und monochromatische Wellenfront trifft auf einen Gegenstand, wird von ihm als Objektwelle reflektiert und breitet sich aus.

2.1.4 Speicherungsprinzip der Holografie

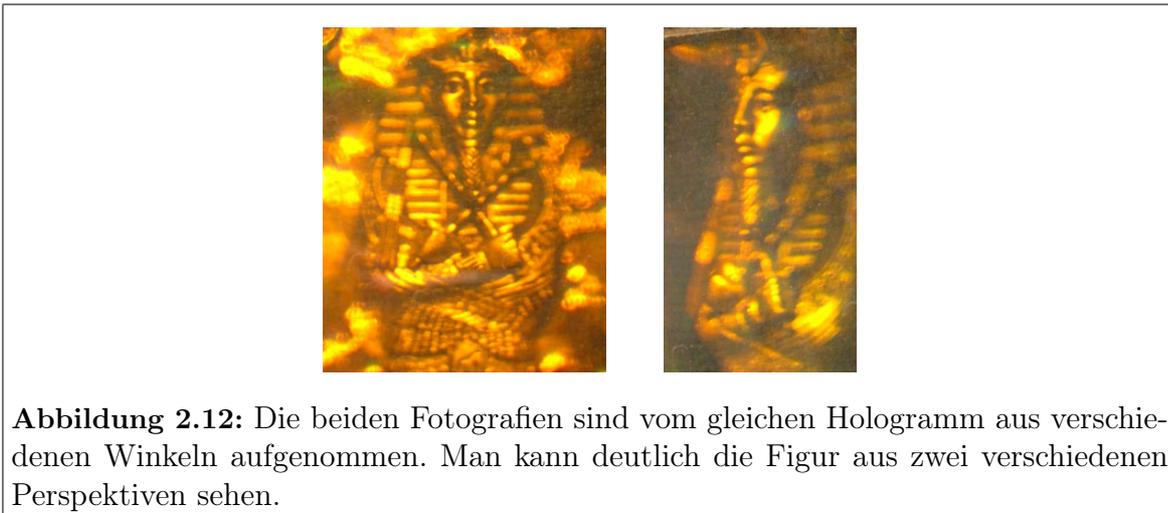


Abbildung 2.12: Die beiden Fotografien sind vom gleichen Hologramm aus verschiedenen Winkeln aufgenommen. Man kann deutlich die Figur aus zwei verschiedenen Perspektiven sehen.

Um ein aufgenommenes Motiv nicht nur aus einer Perspektive, sondern aus allen Richtungen dreidimensional betrachten zu können, muss die ganze Wellenfront des ursprünglichen Objektes rekonstruiert werden. Hologramme erfüllen diese Aufgabe. Dreht man ein Hologramm, so kann man genau die gleiche Beobachtung machen, als ob man einen Gegenstand in den Händen dreht. Man sieht einen stufenlosen Übergang, im Gegensatz zu den im Volksmund als „Wackelbildern“ bekannten Aufnahmen, die nur zwischen zwei Ansichten hin und her springen. Ein Hologramm speichert also die gesamte Objektwelle und nicht nur einzelne Ausschnitte daraus. Die beiden Fotografien in Abb. 2.12 zeigen diesen Effekt. Sie wurden von dem selben Hologramm, aber aus unterschiedlichen Winkeln, aufgenommen und zeigen deutlich unterschiedliche Ansichten

und Details.

Bei der Speicherung der Objektwelle eines Gegenstandes muss zusätzlich beachtet werden, dass diese nicht nur die Informationen über den Gegenstand selbst enthält, sondern auch über die Lichtquelle. Die Speicherung der Information des Gegenstandes ohne Störungen durch die Lichtquelle ist aber nur möglich, wenn die Lichtquelle selbst absolut keine Informationen beiträgt. Diese Forderung erfüllt nur eine Quelle, die regelmäßige ebene Wellenfronten aussendet; also eine monochromatische und kohärente Punktlichtquelle, die sich in unendlicher Entfernung befindet. Laserlicht erfüllt als einzige Lichtquelle diese Anforderungen weitgehend, weshalb Laser Voraussetzung für qualitativ hochwertige Hologramme [Sax04] sind.

Bei der Aufnahme einer Fotografie eines Gegenstandes - genauer gesagt: bei der fotografischen Aufzeichnung eines Ausschnitts der Objektwelle des Gegenstandes - wird nur die Amplitude der Welle an der jeweiligen Position des fotografischen Filmes gespeichert. Die genaue Form der gesamten Objektwelle und damit die Information über die Phasenbeziehungen der einzelnen Elementarwellen geht verloren. Um eine vollständige Aufnahme der Objektwelle zu erhalten, muss also auch die Phase an jedem Punkt gespeichert werden. Dies ist über die Interferenz möglich. Dazu wird eine informationsfreie Referenzwelle der Objektwelle überlagert. Es entsteht ein kompliziertes, stehendes Interferenzmuster, welches je nach Phasenbeziehung zwischen Objekt- und Referenzwelle Stellen unterschiedlich hoher Intensität ausbildet und damit die vollständige Information des Gegenstandes enthält.

Im vorigen Abschnitt wurde angesprochen, dass die Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle ein zeitlich und räumlich stehendes Interferenzmuster ergibt. Dies soll in diesem Abschnitt exemplarisch für den einfachen Fall bewiesen werden, dass zwei Wellen gleicher Frequenz aufeinanderzulaufen. Für die anderen Fälle, bei denen die Wellen in einem Winkel aufeinanderzulaufen (entspricht einer Reflektionsanordnung der Holografie) oder von der gleichen Seite der Platte unter einem bestimmten Winkel aufeinander treffen (entspricht einer Transmissionsanordnung der Holografie), lässt sich mathematisch geringfügig aufwändiger ableiten, dass sich ebenfalls ein stehendes Interferenzmuster ergibt.

Formal kann die Auslenkung einer harmonischen Welle mit Frequenz w , Wellenvektor k und Amplitude A_0 , die sich in x - Richtung ausbreitet, wie folgt geschrieben werden:

$$E(x, t) = A_0 \cdot \cos(\omega t - kx). \quad (2.1)$$

Seien E_1 und E_2 zwei aufeinander zulaufende harmonische Wellen gleicher Amplitude A_0 , gleicher Frequenz w und daher auch gleichem Wellenvektor k . Diese können mathematisch beschrieben werden als:

$$E_1(x, t) = A_0 \cdot \cos(\omega t - kx) \quad E_2(x, t) = A_0 \cdot \cos(\omega t + kx). \quad (2.2)$$

Zur Überlagerung der beiden Wellen werden deren zeitabhängige Amplituden addiert und können mit Hilfe der trigonometrischen Formel

$$\cos(x + y) + \cos(x - y) = 2 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) \quad (2.3)$$

umgeformt werden zu

$$\begin{aligned} E_{\text{resultierend}}(x, t) &= E_1(x, t) + E_2(x, t) = A_0 \cdot \cos(\omega t - kx) + A_0 \cdot \cos(\omega t + kx) \\ &= 2A_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(kx). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Die Entkopplung von Ort x und Zeit t in zwei unabhängige Cosinusterme bedeutet, dass die Überlagerung der beiden Wellen als unabhängige Schwingung im Ort und in der Zeit aufgefasst werden kann. An dem Faktor $\cos(kx)$ kann abgelesen werden, dass unabhängig von der Zeit t an den Orten $x = \frac{2n+1}{4k}\pi$ mit $n = 0, 1, 2, \dots$ feste Nullstellen (Knoten) der Schwingung existieren. Die Überlagerung bildet also eine stehende Welle aus, d.h. das Interferenzmuster ist räumlich konstant. Da die Intensität I des Lichtes proportional zum Quadrat der Amplitude A ist, ist ebenso das Intensitätsmuster räumlich konstant [Sax04].

Der Beweis zeigt neben der Bildung der Wellenfront ohne störende Informationen der Lichtquelle noch einen zweiten Grund für die zuvor diskutierte Voraussetzung einer monochromatischen Lichtquelle zur Holografie auf: Hätten die beiden aufeinanderzulaufenden Wellen verschiedene Wellenlängen λ und damit verschiedene Frequenzen ω , wäre die Umformung in Gleichung 2.4 nicht möglich. Es entstünde kein von der Zeit unabhängiger Cosinusterm und damit keine stehende Welle bzw. Schwingungsknoten. Nicht kohärente Wellen würden ebenfalls dazu führen, dass sich keine stehende Interferenzmuster ausbilden könnten.

Bringt man in das stehende Interferenzmuster von Objekt- und Referenzwelle eine Holografieplatte, kann dieses Interferenzmuster (genauer seine Intensitätsverteilung) gespeichert werden. Die durch die Interferenz entstehende Intensitätsverteilung auf einer in der xy -Ebene stehenden Holografieplatte kann gleichermaßen mathematisch beschrieben werden. In imaginärer Schreibweise wird dabei die Referenzwelle \vec{E}_{Ref} mit Amplitude $\vec{A}_{Ref,0}$, der Frequenz ω , der Zeit t , dem Wellenvektor k und dem Ort $\vec{r}(x, y)$ mathematisch ausgedrückt als:

$$\vec{E}_{Ref} = \vec{A}_{Ref,0} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_0 \vec{r})}. \quad (2.5)$$

Die Objektwelle \vec{E}_{Ob} hat ihrerseits die folgende Form:

$$\vec{E}_{Ob} = \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_{Ob}(x,y))}. \quad (2.6)$$

Die Phase der Objektwelle $\varphi_{Ob}(x, y)$ hängt dabei von der Entfernung der einzelnen Oberflächenpunkte des Gegenstandes zur Holografieplatte ab. Die Überlagerung der Referenzwelle und der Objektwelle ergibt sich durch

$$\vec{E}_{Ueb} = \vec{E}_{Ob} + \vec{E}_{Ref}. \quad (2.7)$$

Es folgt dann für die mathematische Beschreibung der Intensitätsverteilung auf der Fotoplatte am Ort $\vec{r}_0 = (x, y, 0)$ [Dem04]:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= c\epsilon_0 |\vec{E}_{Ueb}(x, y)|^2 = c\epsilon_0 |\vec{E}_{Ob}(x, y) + \vec{E}_{Ref}(x, y)|^2 \\ &= \dots \\ &= c\epsilon_0 |\vec{A}_{Ob,0}^2 + \vec{A}_{Ref,0}^2 + \vec{A}_{Ref,0}^* \cdot \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob}(\vec{r}_0))} \\ &\quad + \vec{A}_{Ref,0} \cdot \vec{A}_{Ob,0}^* \cdot e^{-i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob}(\vec{r}_0))}|. \end{aligned} \quad (2.8)$$

In Gleichung 2.8 ist deutlich zu sehen, dass in der Intensitätsverteilung auf der Holografieplatte die Information der Objektwelle (Gl. 2.6) enthalten ist.

2.1.5 Rekonstruktion der Hologramme

Wird die entwickelte Holografieplatte (siehe „Technische Grundlagen zur Holografie“ Kap. 2.2) wieder in die Aufnahmeanordnung gebracht, so entsteht das virtuelle Bild des Objektes. Der Referenzstrahl der Anordnung dient bei der Betrachtung als monochromatischer und kohärenter Rekonstruktionsstrahl. Das vom Reflektionshologramm reflektierte bzw. vom Transmissionshologramm transmittierte Licht des Rekonstruktionsstrahls wird durch das Reflektions- bzw. Transmissionsgitter so gebeugt, dass durch konstruktive und destruktive Interferenzen eine Wellenfront entsteht, die mit der Wellenfront des Gegenstandes übereinstimmt. Diese Übereinstimmung der rekonstruierten Wellenfront mit der Wellenfront des Gegenstandes soll im Folgenden formal für Transmissionshologramme werden.

Zur Rekonstruktion wird die entwickelte Holografieplatte mit einer kohärenten, monochromatischen und ebenen Rekonstruktionswelle

$$\vec{E}_{Rek} = \vec{A}_{Rek,0} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} \quad (2.9)$$

beleuchtet, die die gleiche Frequenz ω wie die Referenzwelle bei der Aufnahme besitzt. Die Amplitude $\vec{A}_{T,0}$ des durch das Hologramm transmittierten Lichtes ist abhängig von der ortsabhängigen Transmission $T(x, y)$ des Lichtes:

$$\vec{A}_{T,0} = T(x, y) \cdot \vec{A}_{Rek}. \quad (2.10)$$

Die Transmission ist nach Subtraktion eines Offsets T_0 proportional zur Intensität $I(x, y)$ des Lichtes, welches bei der Belichtung auf die Holografieplatte traf

$$T(x, y) = T_0 - \gamma I(x, y), \quad (2.11)$$

wobei γ eine die Empfindlichkeit der Holografieplatte angibt. Die transmittierte Amplitude der Rekonstruktionswelle ergibt sich so zu:

$$\vec{A}_{T,0} = T_0 \cdot \vec{A}_{Rek} - \gamma I(x, y) \cdot \vec{A}_{Rek}. \quad (2.12)$$

Durch Einsetzen der Intensität $I(x,y)$ aus Gl. 2.8 ergibt sich folgende Beschreibung der transmittierten Amplitude $\vec{A}_{T,0}$:

$$\begin{aligned} \vec{A}_{T,0} &= \vec{A}_{Rek} T_0 - \gamma \vec{A}_{Rek} (A_{Ob,0}^2 + A_{Ref,0}^2) \\ &\quad - \gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0}^* \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob})} \\ &\quad - \gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0} \vec{A}_{Ob,0}^* \cdot e^{-i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob})}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Die beiden ersten Terme in Gl. 2.13 sind ortsunabhängig und beschreiben die Schwächung der transmittierten Rekonstruktionswelle. Um die Form der entstehenden Bildwelle

$$\vec{E}_T = \vec{A}_{T,0} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_r \vec{r}_0)} \quad (2.14)$$

zu beschreiben, sind diese beiden ersten Terme daher unnötig. Es werden deshalb nur die ortsabhängigen Amplitudenterme aus Gleichung 2.13 für die Beschreibung der Bildwelle in Gleichung 2.14 genutzt:

$$\begin{aligned} \vec{A}_{T,0} \text{ ortsabhaengig} &= -\gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0}^* \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob})} \\ &\quad - \gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0} \vec{A}_{Ob,0}^* \cdot e^{-i(\vec{k}_0 \vec{r}_0 + \varphi_{Ob})}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Damit ergibt sich die ortsabhängige Gleichung der Bildwelle durch

$$\begin{aligned} \vec{E}_T &= \vec{A}_{T,0} \text{ ortsabhaengig} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_r \vec{r}_0)} \\ &= -\gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0}^* \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\omega t - (\vec{k}_r - \vec{k}_0) \vec{r}_0 + \varphi_{Ob})} \\ &\quad - \gamma \vec{A}_{Rek} \vec{A}_{Ref,0} \vec{A}_{Ob,0}^* \cdot e^{i(\omega t - (\vec{k}_r + \vec{k}_0) \vec{r}_0 - \varphi_{Ob})}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

wobei die Ausbreitungsrichtung durch den Wellenvektor $(\vec{k}_r - \vec{k}_0)$ bzw. $(\vec{k}_r + \vec{k}_0)$ gegeben ist. Beide Terme der Gleichung 2.16 beinhalten die Information der Objektwelle. Der erste Term beinhaltet dabei den Faktor $\vec{A}_{Ob} = \vec{A}_{Ob,0} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_{Ob}(x,y))}$ der identisch zur Objektwelle (Gleichung 2.6) ist. Insbesondere ist also die Frequenz w und damit die Farbe

des rekonstruierten Bildes identisch der Farbe des Aufnahmelichtes. Zusätzlich ist die Phase des gesamten rekonstruierten Bildes identisch zu der Phase der dort aufgezeichneten Objektwelle bei der Aufnahme. Dies bedeutet, dass die Entfernungsinformation des Gegenstandes vollständig rekonstruiert wird und das Hologramm dreidimensional erscheint (sofern der Gegenstand dreidimensional war). Der zweite Term enthält ebenso die Objektwelle \vec{A}_{Ob}^* als Faktor, jedoch in der konjugiert komplexen Form, so dass das Vorzeichen der Phase negativ wird. Er beschreibt daher ein zweites, sogenanntes pseudoskopisches Bild. Dieses pseudoskopische Bild wird dabei in eine andere Richtung, als das virtuelle Bild, gebeugt da hier die Wellenvektoren summiert statt subtrahiert werden.

Betrachtet man ein Hologramm eines Gegenstandes genau, so kann man aus unterschiedlichen Richtungen zum einen das virtuelle Bild dieses Gegenstandes sehen, zum anderen aber auch das pseudoskopische Bild, bei dem aber die Abstände vertauscht sind. Dies bedeutet, dass Punkte der Oberfläche, die vorher im hinteren Teil lagen, liegen im pseudoskopischen Bild im Vordergrund und umgekehrt. Man erhält dadurch den Eindruck, dass man in das Innere eines Wachsabdruckes dieses Gegenstandes schaut. Dieses pseudoskopische Bild eines Hologrammes wird genutzt, um Kopien von Hologrammen herzustellen, bei denen es dann auch möglich ist, die virtuellen dreidimensionalen Bilder vor der Platte im Raum „schweben“ zu lassen. Näheres dazu findet sich in [Sax04].

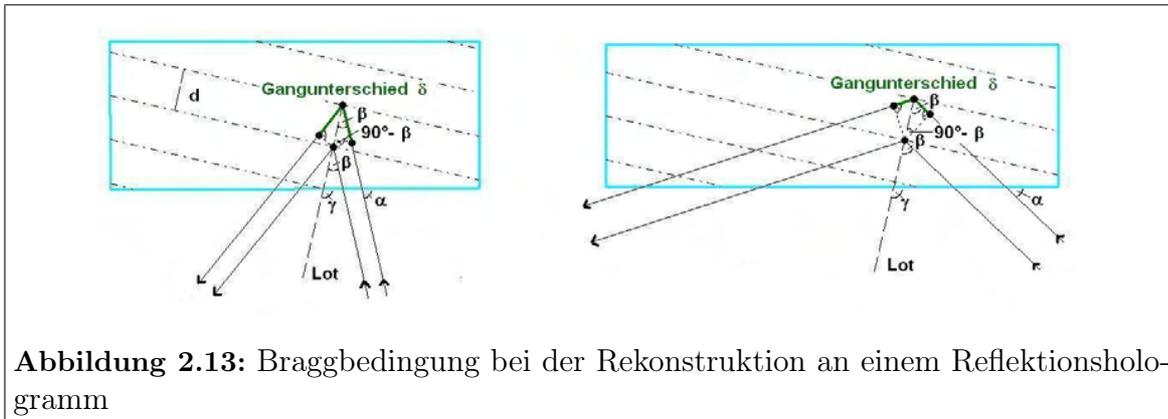
Im Beweis zur Rekonstruktion von Hologrammen 2.16, wird vorausgesetzt, dass die Rekonstruktionswelle die gleiche Frequenz w und damit gleiche Wellenlänge λ wie die Referenzwelle besitzt. Bei Reflektionshologrammen (auch Weißlichthologramm) ist dies im Gegensatz zu Transmissionshologrammen nicht zwingend nötig. Bei Reflektionshologrammen ist es möglich, das virtuelle Bild mit weißem Licht einer punktförmigen Lichtquelle zu betrachten. Weißes Licht besteht aus allen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums von rot bis blau. Bei der Reflektion am Hologramm tragen auf Grund der Braggbedingung nur diejenigen Wellenzüge zum Bild des Hologrammes bei, deren Wellenlängen zu dem Gitter des Hologrammes passen. Alle anderen Wellenzüge werden diffus in den Raum reflektiert. Dadurch erscheint das Bild im Vergleich zur Beleuchtung mit einer Lichtquelle der passenden Wellenlänge schwächer ist aber deutlich in der Farbe des Aufnahmelichtes sichtbar.

2.1.6 Verblüffende Effekte

Spiel mit Farben

Aufgrund der Braggbedingung ist es bei Reflektionshologrammen ist es aufgrund der Braggbedingung möglich, durch Änderung der Lichteinfallswinkel die Farbe des späteren Hologrammes zu beeinflussen. Die Braggbedingung für Reflektionshologramme

ist in Abb. 2.13 skizziert.



Zunächst wird die linke Zeichnung betrachtet. Das türkise Rechteck stellt die Emulsion eines Hologrammes dar, in der die Interferenzstreifen (Strich - Punkt Linien) in regelmäßigen Abständen d zueinander liegen. Diese Abstände entsprechen der Gitterkonstanten des Hologrammes. Unter dem Winkel α zur Plattenoberfläche fällt ein paralleles Lichtbündel ein, welches dann unter dem Winkel β zum Lot (der Interferenzstreifen) auf die Interferenzstreifen auftrifft und reflektiert wird. Es entsteht ein Gangunterschied δ zwischen den beiden Strahlen, der in Abb. 2.13 grün markiert ist. Dieser Gangunterschied kann durch die beiden, in der Abbildung entstehenden, rechtwinkligen, konkruenten Dreiecke mit den Seiten d und $\frac{\delta}{2}$ und dem Winkel $90^\circ - \beta$ berechnet werden. Bei einem Gangunterschied von λ der Strahlen kommt es zur konstruktiven Interferenz⁵. Die Braggbedingung hierfür lässt sich daher, mit Hilfe des trigonometrischen Zusammenhangs in dem entstehenden rechtwinkligen Dreieck zu

$$\lambda = 2d \cdot \sin(90^\circ - \beta) \quad (2.17)$$

bestimmen. Interessant ist aber die Braggbedingung in Abhängigkeit des Einfallswinkels α des Lichtes zur Platte. Betrachtet man die drei Winkel α (Winkel zwischen einfallendem Strahl und der Plattenoberfläche), β (Winkel zwischen Lot der Interferenzstreifen und einfallendem Strahl) und γ (Winkel des Lotes der Interferenzstreifen zur Plattenoberfläche), so ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\gamma = \alpha + \beta \quad \Leftrightarrow \quad \beta = \gamma - \alpha. \quad (2.18)$$

Setzt man dies in 2.17 ein so ergibt sich:

$$\lambda = 2d \cdot \sin(90^\circ - \gamma + \alpha), \quad (2.19)$$

⁵Interferenzen höherer Ordnungen kommen bei der Rekonstruktion von Hologrammen in der Regel nicht vor. Mit $k=1$ gilt daher für den Gangunterschied $\delta = k \cdot \lambda = \lambda$ [Sax04].

wobei γ eine konstante Größe ist (die nur von der Aufnahmegeometrie abhängt). Der Ausdruck $90^\circ - \gamma + \alpha$ liegt dabei im Intervall $[0^\circ, 90^\circ]$ ⁶, in dem die Sinusfunktion monoton steigt. Mit wachsendem Winkel α wird also die konstruktiv reflektierte Wellenlänge größer. Betrachtet man z.B. ein eigentlich rotes Hologramm unter weißem Licht und lässt dabei den Einfallswinkel α des Rekonstruktionsstrahls immer kleiner werden, so ist es möglich das Hologramm in allen Farben des sichtbaren Spektrums von rot bis blau zu betrachten ⁷. Für die Anwendung der Braggbedingung von Hologrammen im Schulunterricht sollte die Argumentation mit Gl. 2.17 enden, da die angegebene Herleitung der Braggbedingung in Abhängigkeit von α eher zur Verwirrung als zu neuen Erkenntnissen der Schüler führt. Stattdessen kann anschaulich gemacht werden, dass bei kleiner werdendem α auch $90^\circ - \beta$ kleiner wird und damit der Gangunterschied ebenfalls kleiner wird. Dies lässt sich anhand von weiteren Zeichnungen wie z.B. Abb. 2.13 rechts zeigen oder sogar einem dynamischen Geometrieprogramm wie Euklid (mit dem auch die Zeichnungen aus Abb. 2.13 gemacht wurden) animieren.

Durchgeschnittene Hologramme

Schneidet man eine Fotografie in der Mitte durch, so erhält man zwei Hälften der Fotografie. Man kann auf der einen Hälfte, egal aus welcher Richtung man sie betrachtet, immer nur die eine Hälfte des Motivs sehen, auf der Anderen die andere Hälfte. Schneidet man hingegen ein Hologramm in der Mitte durch, so kann man unter Winkelschränkungen auf beiden Hologrammhälften das vollständige Motiv sehen. Diese verblüffende Eigenschaft der Hologramme lässt sich anhand des Modellautos hinter der Glasscheibe aus Kap. 2.1.3 leicht nachvollziehen. Wie bereits beschrieben, trifft auf jeden Punkt einer vor dem Gegenstand stehenden Scheibe Licht jedes Punktes des Gegenstandes. Für die Aufnahme eines Hologrammes bedeutet dies, dass auf jedem Punkt des Hologrammes jeder Punkt des Gegenstandes aus der jeweiligen Perspektive gespeichert ist. Schneidet man ein Hologramm durch, so ist auf beiden Hälften immer noch die volle Information nun aber nach zwei Winkelbereichen getrennt, gespeichert. Man kann daher immer noch den Gegenstand sehen. Der einzige Informationsverlust betrifft den Winkel, aus der man den Gegenstand sehen kann. Betrachtet man die rechte Seite der Holografieplatte, so kann man das Hologramm nur noch aus der mittleren bis rechten Perspektive sehen, auf der linken Hälfte entsprechend nur aus der linken Hälfte der Perspektive.

⁶Da γ im Intervall von $[90^\circ, 180^\circ]$ liegt, folgt für den Bereich von des Winkels $90^\circ - \gamma$, dass er im Intervall $[-90^\circ, 0^\circ]$ liegt. α kann wiederum maximal den Winkel 180° einnehmen und hat eine Mindestgröße von $\gamma - 90^\circ$, was einen Lichteinfall parallel zu den Interferenzstreifen bedeuten würde. Hieraus ergeben sich für den Winkel $90^\circ - \gamma + \alpha$ die Intervall $[0, 90]$.

⁷Dabei ist zu beachten, dass sich der Betrachter selbst ebenfalls in einen kleineren Winkel zur Platte bringen muss, damit dass an der Platte reflektierte Licht auch in sein Auge trifft.

2.1.7 Anwendungen der Holografie

Die Holografie besitzt neben ihrer bekanntesten Anwendung in der Kunst ein breites Anwendungsspektrum. Im Folgenden werden exemplarisch einige Anwendungen aus den Bereichen Materialforschung, Sicherheit, Medizin und der Datenspeicherung vorgestellt.

Holografische Interferometrie

Hologramme eignen sich aufgrund ihrer extrem hohen Auflösung zur Anwendung in der Materialforschung und Messtechnik. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Aufnahme interferometrischer Hologramme. Am weitesten verbreitet sind das Echtzeitverfahren, das Zeitmittelungsverfahren und das Doppelbelichtungsverfahren. An dieser Stelle soll nur das Doppelbelichtungsverfahren vorgestellt werden, welches im Rahmen der durchgeführten Unterrichtsreihe genutzt wurde. Näheres zu den anderen Verfahren findet sich in [Sax04, Hei95].

Doppelbelichtungsverfahren

Entsprechend des Namens des Verfahrens, wird hier das Hologramm zweimal mit minimaler Änderung des Gegenstandes belichtet. Zunächst wird die Objektwelle des zu untersuchenden Gegenstandes mit der Hälfte der Belichtungszeit aufgenommen. Dann wird der Gegenstand beispielsweise durch Anbringen eines Gewichtes oder durch Erwärmung belastet, ohne aber die Anordnung zwischen Gegenstand und Platte zu verändern. Daraufhin wird erneut eine Aufnahme auf der gleichen Holografieplatte und der zweiten Hälfte der Belichtungszeit von dem nun belasteten Gegenstand gemacht. Erst danach wird die Holografieplatte, wie bereits in Kap. 2.2.2 beschrieben, entwickelt. Bei der Rekonstruktion werden durch die Doppelbelichtung gleichzeitig die Wellenfronten des unbelasteten und des belasteten Gegenstandes rekonstruiert. Durch die Überlagerung dieser beiden Wellenfronten können in einer Interferenzstruktur minimale Veränderungen des Gegenstandes sichtbar gemacht werden.



Abbildung 2.14: Interferometrisches Doppelbelichtungshologramm eines belasteten Getriebegehäuses. Entnommen aus [Hei95]

Aufgrund der periodischen Struktur der Lichtwellen interferieren die beiden Wellenfronten an denjenigen Orten konstruktiv, bei denen die Verformung des Objektes keine, eine oder mehrere ganzzahlige Wellenlängen betrug. Hier erscheint das Hologramm hell. An denjenigen Stellen jedoch, an denen sich das Objekt um ungeradzahlige Vielfache der halben Wellenlänge verschoben haben, erscheint das Hologramm auf Grund der destruktiven Interferenz dunkel. In der interferometrischen Doppelbelichtungsaufnahme eines Getriebegehäuses (Abb. 2.14) ist deutlich das durch die Interferenz entstehende Hell-Dunkel Muster zu erkennen. Dieses Muster kann ähnlich wie Höhenschichtlinien einer topografischen Landkarte analysiert werden. Von Linie zu Linie nimmt die Verformung des Objekts jeweils um eine halbe Lichtwellenlänge zu. Anhand dieser Informationen können Rückschlüsse auf die Belastungsverteilung des untersuchten Gegenstand gezogen werden [Hei95, BS03].

Hologramme als Sicherheitsmerkmal

Da Hologramme eine riesige Fülle von Informationen speichern können, ist es sehr schwierig Hologramme zu kopieren, sofern man nicht als einzig geeignete Vorlage das sogenannte Masterhologramm besitzt. Daher werden Weißlichthologramme als Sicherheitsmerkmal z.B. auf Banknoten und Personalausweisen verwendet [Bun04, Deu05].



Abbildung 2.15: Holografische Sicherheitsmerkmale eines Personalausweises. Entnommen aus [Bun04]

Ein besonders hohes Maß an Sicherheit bieten dabei individualisierte Hologramme, die bei jeder Person unterschiedlich sind und sich daher noch schwerer fälschen lassen [BS03]. In Abbildung 2.15 sind die holografischen Sicherheitsmerkmale bei einem Personalausweis dargestellt. Gleich rechts neben dem Passbild befindet sich ein personalisiertes Hologramm. Dieses Hologramm erscheint allerdings nur zweidimensional, da die Vorlage (das Passbild) nur zweidimensional ist. Es wird hier also nicht die Eigenschaft ausgenutzt, dass Hologramme dreidimensionale Bilder rekonstruieren können, sondern diejenige, dass sie nur in bestimmten Winkelbereichen zu sehen sind.

Diese personalisierten Hologramme von Personalausweisen sind sogenannte „dicke“ Hologramme⁸. Bei diesen ist es nur dann möglich die Objektwelle zu rekonstruieren, wenn die Bragg-Bedingung exakt erfüllt ist. Das Hologramm ist daher nur in einem sehr kleinen Winkelbereich zu sehen. Durch diesen kleinen Winkelbereich ist auch der Wellenlängenbereich, in dem das rekonstruierte Bild erscheint, ebenfalls sehr eingeschränkt. Das Hologramm erscheint daher in einer bestimmten Farbe (bei Personalausweisen in grün) [BS03, Bun04].

Holografie in der Medizin

Die Holografie findet auch in der Medizin wichtige Anwendungen. So wurde z.B. am caesar (Center of Advanced European Studies and Research) in Bonn eine mobile Holografiekamera entwickelt, mit der eine digitale holografische Gesichtsvermessung möglich ist. Zur Vorbereitung von komplizierter Operationen im Gesichts- und Kopfbereich können Ärzte von ihren Patienten Hologramme anfertigen lassen. Die holografische Aufnahme kann dann über entsprechende Software von den Ärzten auf einem normalen Computer dreidimensional dargestellt werden. Das dreidimensionale Computermodell des Patienten kann dabei beliebig gedreht und vergrößert werden. Die Aufnahmen haben eine so gute Messgenauigkeit, dass selbst Hautporen und feine Härchen des Patienten sichtbar werden (Abb. 2.16).

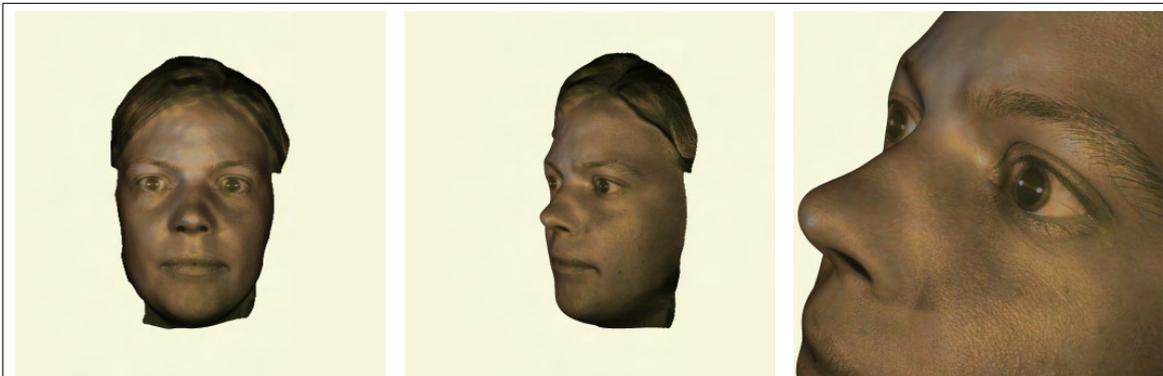


Abbildung 2.16: Durch die digitale holografische Gesichtsvermessung können dreidimensionale Computermodelle eines Patienten, zur Vorbereitung auf komplizierte Operationen, hergestellt werden. Entnommen aus [Her06]

Zur optimalen Operationsplanung ist es zusätzlich möglich, die holografische Aufnahme der Gesichtsoberfläche mit Daten von Computertomografien zu überlagern. Durch die Verbindung der beiden Verfahren entsteht so ein dreidimensionales Modell des Patienten, welches sowohl die knöcherne Struktur im Gesichtsbereich als auch das darüber

⁸Dicke Hologramme, sind Hologramme mit einer Emulsionsschicht, die wesentlich dicker als eine Wellenlänge ist.

liegende Weichgewebe (Muskeln, Haut und Haare) darstellt. Die Verbindung dieser Verfahren ermöglicht daher im Bereich der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie neue Möglichkeiten der Operationsplanung und erleichtert es so optimale Ergebnisse zu erzielen [Her06].

Holografische Datenspeicher

Die moderne Gesellschaft erzeugt immer mehr Daten, die gesichert werden müssen. Diese Datenflut lässt herkömmliche Speicher schnell an ihre Grenzen stoßen. Gegenüber konventionellen Speichern besitzen holografische Systeme den Vorteil, dass sie das gesamte Volumen und nicht nur eine Fläche des Speichermaterials d.h. der Emulsion nutzen. In einer Emulsionsschicht lassen sich aufgrund der Bragg-Bedingung viele Hologramme überlagern. Die Information eines Bits lässt sich prinzipiell in einem Würfel mit einer Kantenlänge von einer Wellenlänge speichern. Bei einer Hochrechnung auf das Volumen einer CD könnten so mehr als 10 Terabyte gespeichert werden. Ein Hologramm vom Format einer CD könnte also die gleiche Datenmenge speichern wie 14.285 herkömmliche CDs mit einer Speicherkapazität von 700 MB. Entsprechende Medien sind in Entwicklung, konnten aber noch nicht in der Praxis realisiert werden [BS03]. Ein anderer Ansatz nutzt die Wellenlängenabhängigkeit der Braggbedingung aus. Dabei wird das Hologramm mit verschiedenen Lichtwellenlängen ausgelesen werden. Je nach Wellenlänge können so im gleichen Volumen verschiedene Informationen gespeichert und aus ihm rekonstruiert werden [BS03].

Neben der riesigen Datenmenge die holografische Datenspeicher aufnehmen können, haben sie eine weitere faszinierende Eigenschaft. Mit ihnen ist ein extrem schneller Zugriff auf die Daten möglich. Die Daten werden sozusagen „Seitenweise“ abgespeichert. Bei der Rekonstruktion werden alle auf einer Seite stehenden Daten gleichzeitig ausgelesen, so dass Datentransferraten von einigen Gigabyte pro Sekunde und Zugriffszeiten von weniger als einer Millisekunde erreicht werden können [Den04].

2.2 Technische Grundlagen zur Holografie

Nachdem die Entstehung eines Hologrammes theoretisch beschrieben wurde, wird in diesem Kapitel nun die dazugehörige technische Seite behandelt. Dabei wird zunächst auf das Aufzeichnungsmaterial eingegangen und erläutert, welche physikalischen Vorgänge bei der Speicherung darin stattfinden. In Kapitel 2.2.2 erfolgt eine kurze Beschreibung des Entwicklungsprozesses der Hologramme. Danach werden einige Anordnungen zur Aufnahme von Hologrammen vorgestellt und es wird auf die Eigenschaften der jeweils entstehenden Hologramme eingegangen.

2.2.1 Speichermedium Holografieplatte

Wie bei den Filmen eines Fotoapparates gibt es auch bei der Holografie zahlreiche Filme und Platten, die sich in ihrem Auflösungsvermögen (abhängig von Korngröße und Linienbreite), ihrem Absorptionsverhalten, ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrer Schichtdicke, ihrer Qualität und natürlich im Preis unterscheiden. Das Speicherprinzip ist jedoch bei allen optisch hergestellten Hologrammen prinzipiell gleich. Im Folgenden soll dies an dem Speichermedium besprochen werden, das im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit genutzt wurde. Für Leser, die sich mit dem Thema weiterführend beschäftigen möchten, bietet sich die Lektüre von [Sax04] an.

Die zur Zeit meist genutzte Emulsion ist die Silberhalogenid Emulsion. Holografieplatten, wie z.B. die BB Platten der Firma Colourholographics⁹, bestehen aus einer gewöhnlichen Glasplatte, die auf einer Seite eine ca. 6 μm dicke Emulsionsschicht besitzt. Diese Emulsion besteht aus Gelatine, in der Silberbromidkristalle (AgBr), die kleiner als 25nm sind, unregelmäßig eingebettet sind [Uli06]. Die Holografieplatten werden nach einer gewissen Zeit lichtunempfindlich. Die Lichtempfindlichkeit kann für eine kurze Zeit (ca. 24h) allerdings durch Vorbehandlung der Holografieplatten - dem sogenannten Vorquellen - wieder hergestellt werden. Dazu werden die Platten für 3 Minuten in einer 0,5% Triethanolaminlösung (TEA) geschwenkt. Das Bad sorgt dafür, dass die mit der Zeit austrocknenden Platten wieder feucht werden und zusätzlich beschleunigt das TEA als „Elektronengeber“ den Belichtungsprozess [Uli06].

Belichtung

Bei der Belichtung wird die Holografieplatte im Überlagerungsgebiet der Objekt- und Referenzwelle fixiert. Da das Interferenzmuster nach Gl. 2.4 räumlich konstant ist, trifft an manchen Stellen der dreidimensionalen Emulsionsschicht Licht mit hoher Intensität, an anderen Stellen mit weniger Intensität oder gar kein Licht auf. In Abbildung 2.17 ist ein solches Intensitätsmuster gezeigt. Die Abbildung ist ein Bildausschnitt von „Source-

⁹die für dieses Projekt genutzt wurden

demo“, einem Simulationsprogramm¹⁰ für Interferenzen. Es simuliert das entstehende Intensitätsmuster bei der Überlagerung einer sphärischen Objektwelle, die von (2) ausgeht, mit einer ebenen Referenzwelle, die von (1) ausgeht. In dieser Simulation ist in grün die Holografieplatte eingezeichnet. Verlängert man in Gedanken die in schwarz und weiß dargestellten Intensitätsstreifen, so wird klar, dass in der Emulsion der Platte streifenförmige Bereiche vorhanden sind, in denen entweder viel Licht, wenig Licht oder gar kein Licht auftrifft. Die Kristalle, die an denjenigen Stellen der Emulsionsschicht sitzen, die dem Laserlicht ausgesetzt sind, werden im Folgenden näher betrachtet.

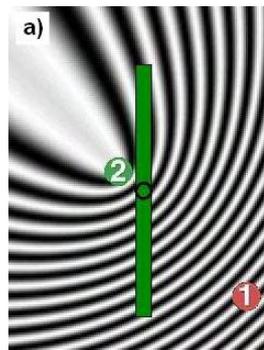


Abbildung 2.17: Simulation des Intensitätsmusters bei Überlagerung einer sphärischen Objektwelle, die von 2 ausgeht und einer ebenen Referenzwelle, die von 1 ausgeht. Entnommen aus [HB03b]

Trifft ein Photon einen Silberbromidkristall, so kann das Photon durch ein Elektron der Ionenbindung absorbiert werden. Dieses Elektron erhält dadurch genügend Energie, um sich über den Fotoeffekt aus seiner Bindung zu lösen. Dadurch bricht eine der Ionenbindungen zwischen einem Bromanion und einem Silberkation auf. Das nun freie Elektron bildet dann mit dem nächstliegenden Silberanion ein neutrales Silberatom, das als „Silberkeim“ ungebunden im Kristall sitzt [Hol85]. Dadurch wird das Kristallgitter der belichteten Kristalle stellenweise zerstört. Die Kristalle, die an dunklen Stellen der Platte sitzen, bleiben unverändert. Das Intensitätsmuster der Referenz- und Objektwelle ist in Form eines latenten Bildes gespeichert [Sax04, Uli06].

Um möglichst gute Ergebnisse bei der Aufnahme eines Hologrammes zu erzielen, ist es nötig, dass die Platte sich komplett im Überlagerungsgebiet der beiden Strahlen befindet, also sowohl vom Objekt- als auch vom Referenzstrahl vollständig ausgeleuchtet wird. Stellen, die nur von Objekt- oder von Referenzwelle beleuchtet werden, können aufgrund des fehlenden Phasenvergleichs zwischen den beiden Wellen nicht die voll-

¹⁰Das Programm kann kostenlos unter [HB03b] heruntergeladen werden kann. Die dazugehörige Anleitung zu diesem Programm findet sich in [HB03a].

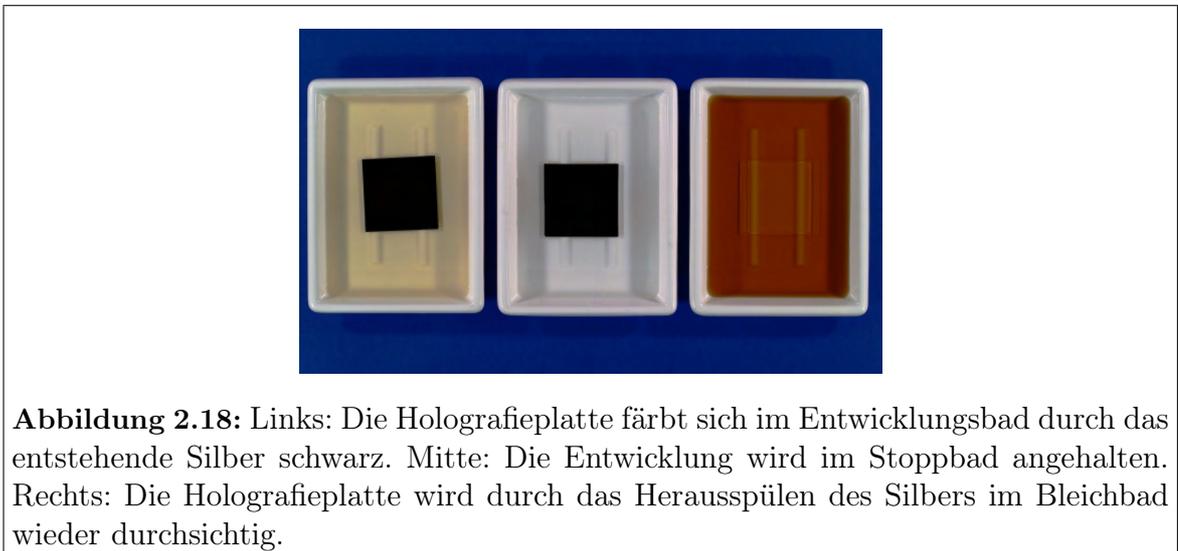
ständige Information der Objektwelle speichern. Außerdem bleiben Stellen, die von keinem der Strahlen getroffen werden, gänzlich unbelichtet. Zudem sollten Interferenzstreifen sowohl im Referenz- als auch im Objektstrahl vermieden werden, da an den Intensitätsminima der Interferenzstreifen kein Licht auf die Emulsion trifft und daher keine Informationen gespeichert werden können. Auch die Belichtungszeit spielt bei der Aufnahme von Hologrammen eine Rolle, da die Holografieplatten eine bestimmte Energie benötigen um weder unter- noch überbelichtet zu werden. Für die BB Platten liegt diese bei $150 \frac{\mu J}{cm^2}$. Die Belichtungszeit t ergibt sich dann mit der Formel:

$$\frac{P}{cm^2} = \frac{W}{t \cdot cm^2} \Leftrightarrow t = \frac{W/cm^2}{P/cm^2}. \quad (2.20)$$

Die Laserleistung P pro cm^2 kann dabei mit Hilfe eines Photometers an der Stelle an der die Holografieplatte angebracht wird.

2.2.2 Entwicklung der Hologramme

Die Entwicklung eines Hologrammes wird in den drei Schritten „entwickeln, stoppen und bleichen“ vorgenommen, ähnlich der Entwicklung von schwarz-weiß Negativen eines Fotoapparates. Bei jedem dieser Schritte wird das Hologramm im entsprechenden Bad geschwenkt, um eine möglichst gleichmäßige Reaktion zu erhalten. Je nach genutzter Emulsion und Art der Hologramme werden verschiedene Zusammensetzungen der Bäder verwendet. Die grundlegenden Prozesse sind auch hier bei allen Bädern gleich.



Zunächst wird die Holografieplatte im Entwicklungsbad geschwenkt. Der Entwickler reduziert positive Silberionen zu Silber. Kristalle, die schon ein neutrales Silberatom

besitzen, beschleunigen die Reaktion des Entwicklers. Wird die Holografieplatte im Entwicklungsbad geschwenkt, werden daher hauptsächlich die bereits belichteten Kristalle, in denen schon neutrale Silberatome vorhanden sind, entwickelt. D.h. alle Silberionen der belichteten Kristalle werden zu Silber reduziert. Wird eine Holografieplatte zu lange im Bad gelassen, werden jedoch auch alle anderen Kristalle entwickelt. Das bei der Belichtung gespeicherte Interferenzmuster geht dadurch verloren. Während des Entwickelns ist der Vorgang daran zu beobachten, dass die entstehenden Silberatome die Schicht schwarz färben (Abb. 2.18 links).

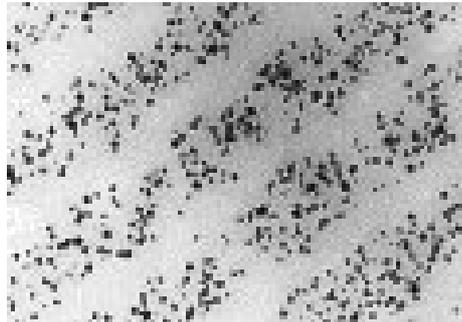


Abbildung 2.19: Elektronenmikroskopaufnahme eines entwickelten Hologrammes. Deutlich sind die in einem Band unregelmäßig angeordneten Silberkristalle zu sehen. Entnommen aus [Bly05].

Die mit einem Elektronenmikroskop aufgenommene Abb. 2.19 zeigt einen Ausschnitt eines Hologrammes nach dem Entwicklungsbad. Anhand dieser Abb. kann man deutlich sehen, wie das Interferenzmuster in der Emulsion gespeichert ist. Die als schwarze Punkte zu erkennenden Silberkristalle sind in Streifen unregelmäßig angeordnet. Diese Streifen waren bei der Belichtung hoher Lichtintensität ausgesetzt. Dennoch befinden sich innerhalb des Streifens, indem die Silberkristalle sitzen, auch Stellen an denen keine schwarzen Punkte zu sehen sind. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass an diesen Stellen bei der Belichtung keine Silberbromidkristalle in der Emulsionsschicht saßen [Uli06].

Im nächsten Entwicklungsschritt wird in einem Stoppbad der Entwickler von der Holografieplatte abgewaschen und die Entwicklungsreaktion gestoppt (Abb. 2.18 mitte). Der letzte Schritt der Entwicklung wird mit Hilfe eines Bleichbades vorgenommen. Dieses spült die Silberatome vollständig aus der Gelatineschicht heraus. Die unbelichteten Silberbromidkristalle bleiben davon unberührt. Das Herausspülen des Silbers ist beim Bleichen ebenfalls zu beobachten: die Fotoplatte wird nach und nach völlig transparent (Abb. 2.18 rechts). Die Emulsionsschicht wird beim Bleichen sozusagen „durchlöchert“ wie ein Schwamm. Abhängig von der Aufnahmeanordnung bei der Belichtung entsteht

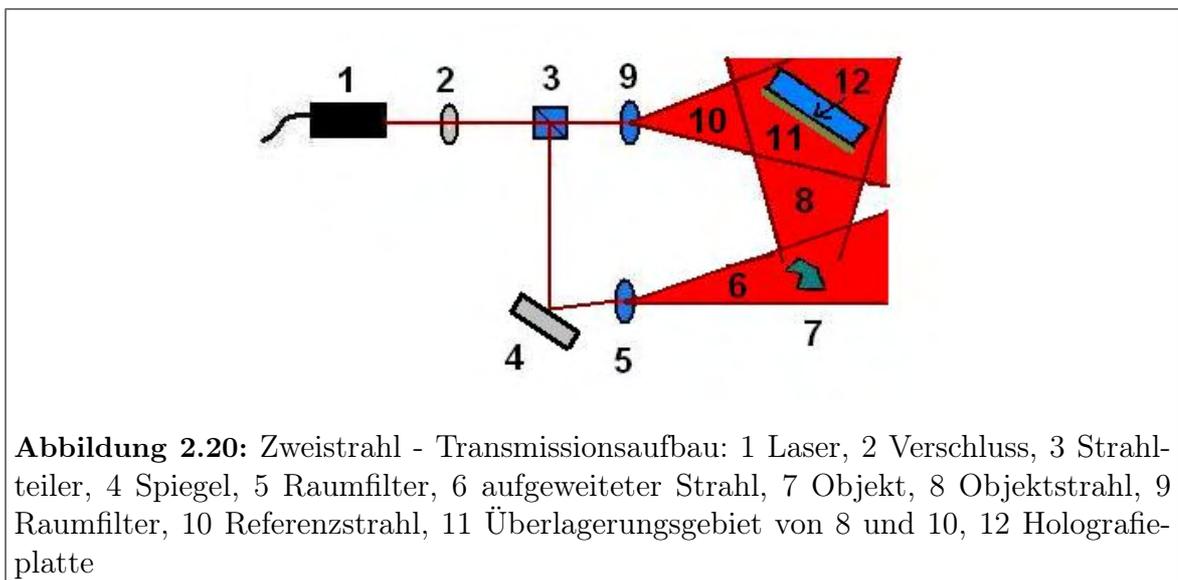
durch diese dreischrittige Entwicklung aus der Emulsionsschicht ein dreidimensionales Reflektions- bzw. Transmissionsgitter [Sax04, Hol85].

2.2.3 Anordnungen zur Aufnahme von Hologrammen

Zur Aufnahme von Hologrammen sind zahlreiche Geometrien möglich. Je nach verwendeter Geometrie erhalten die damit hergestellten Hologramme unterschiedliche Eigenschaften. Nachdem in Kap. 2.1.1 bereits Holografieaufbauten von Gabor, Upatnieks und Denisyuk vorgestellt wurden, werden hier weitere wichtige Realisierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Die verschiedenen möglichen Anordnungen zur Holografie werden üblicherweise nach ihren Merkmalen benannt. Die hier vorgestellten „Zweistrahl - Aufbauten“ besitzen entsprechend zwei getrennte Strahlen, die im allgemeinen durch einen Strahlteiler erzeugt werden. Ein Beispiel für einen Zweistrahl - Aufbau wurde bereits in Kap. 2.1.1 Abb. 2.5 vorgestellt. Transmissions- bzw. Reflektionsaufbau bedeutet zusätzlich, dass der Referenzstrahl bei der Betrachtung des fertigen Hologramms durch die Holografieplatte transmittiert bzw. an ihr reflektiert wird, um das virtuelle Bild zu erzeugen.

Zweistrahl - Transmissionsaufbau:



In Abbildung 2.20 ist ein Zweistrahl - Transmissionsaufbau dargestellt. Der Laserstrahl (1) läuft zunächst durch einen elektronisch gesteuerten Verschluss (2). Dieser sorgt bei der Belichtung des Hologrammes für die Einhaltung der optimalen Belichtungszeit. Danach gelangt der Strahl zu einem Strahlteiler (3). Die eine Hälfte des Laserstrahls wird durch den Strahlteiler geradlinig hindurch transmittiert, die andere Hälfte wird in

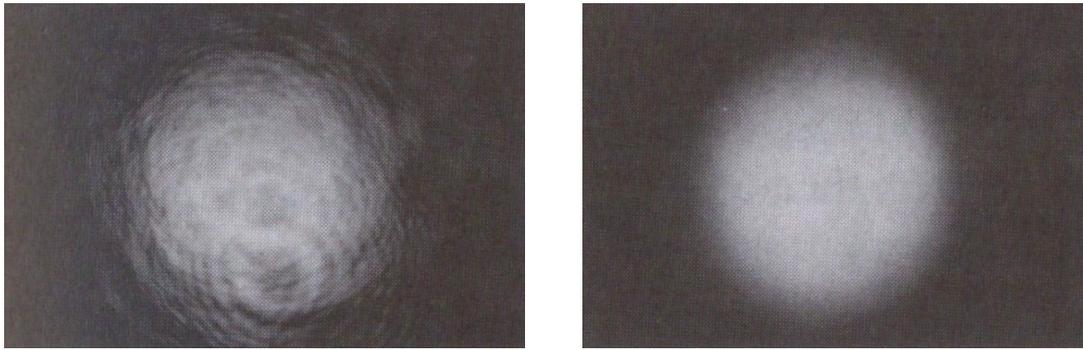


Abbildung 2.21: Links: Linsenfehler sorgen für Streulicht, das dann im Strahl Interferenzstreifen erzeugt. Rechts: Der Raumfilter filtert diese Interferenzstreifen heraus, es entsteht ein reiner Strahl. Entnommen aus [Sax04]

einem 90° Winkel reflektiert. Einer der beiden Strahlen wird dann von einem Spiegel (4) zu einem Raumfilter (5) gelenkt.

Dieser dient zur Filterung des Strahls: Jede Linse hat aufgrund von sphärischer Abbe-
ration oder anderen Linsenfehlern einen nicht idealen Brennpunkt. Zudem entsteht an
Kratzern und Verunreinigungen der Linse Streulicht [Hei95]. Durch dessen Überlage-
rung mit dem eigentlichen Strahl werden Interferenzstrukturen im Strahl erzeugt, wie
in Abb. 2.21 links gezeigt ist.



Abbildung 2.22: Raumfilter; entnommen aus [New06]

Ein Raumfilter (Abb. 2.22) filtert diese heraus. Er besteht aus einer Kombination einer
Linse mit kleiner Brennweite und einer Lochblende, deren Größe auf die Brennweite

der Linse abgestimmt ist. Eine Tabelle, in der eine Zuordnung von Brennweite und Lochblendengröße gegeben ist, befindet sich in [Hei95]. Die Lochblende wird so hinter die Linse justiert, dass der „richtige“ Brennpunkt genau in der winzigen Öffnung der Lochblende sitzt. Auf diese Weise können nur diejenigen „Lichtstrahlen“, die durch den idealen Brennpunkt laufen, die Blende passieren. Es entsteht ein reiner, aufgeweiteter Strahl (Abb. 2.21 rechts), der keinerlei Streifen oder Flecken zeigt.

Der durch den Raumfilter gefilterte und aufgeweitete Strahl (6) trifft auf das Objekt (7) und wird von ihm reflektiert. Der reflektierte Strahl trägt nun die Information des Objektes und gelangt als Objektstrahl (8) auf die Holografieplatte (12). Der andere Teil des Laserstrahls wird nach dem Strahlteiler ebenfalls von einem Raumfilter (9) aufgeweitet. Dieser aufgeweitete Strahl trägt keinerlei Informationen und trifft als Referenzstrahl (10) auf die Holografieplatte (12), die sich im Überlagerungsbereich von Objekt- und Referenzstrahl (11) befindet. Die Holografieplatte ist dabei in der Regel so im Aufbau positioniert, dass die Emulsion zum Objekt zeigt. Dies hat den Vorteil, dass der ohnehin meist schwächere Objektstrahl direkt auf die Platte trifft und so beim Durchdringen der Glasplatte keinen weiteren Intensitätsverlust erfährt.

Zweistrahl - Reflektionsaufbau:

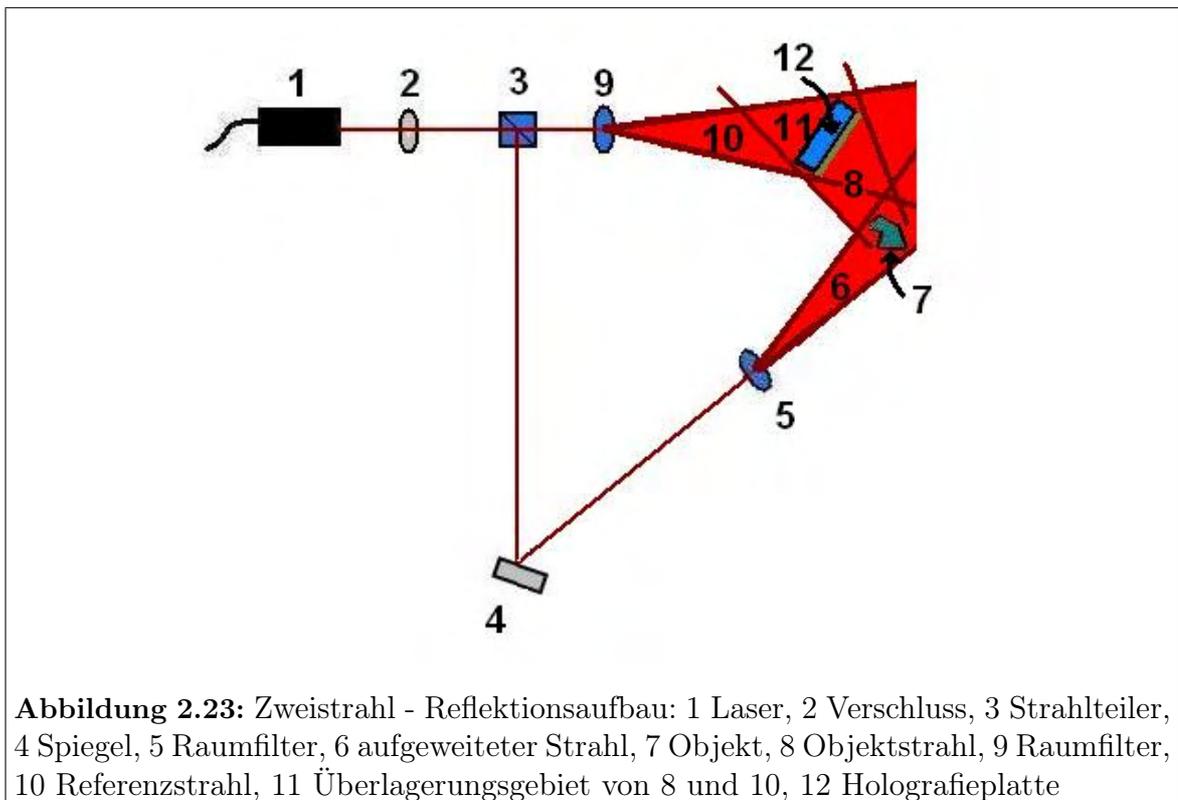


Abbildung 2.23 zeigt einen Zweistrahl - Reflektionsaufbau. Der Laserstrahl (1) tritt wiederum durch den Verschluss (2) und wird vom Strahlteiler (3) in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Einer der Strahlen wird durch einen Spiegel (4) zu einem Raumfilter (5) umgelenkt, von dem er aufgeweitet wird. Der aufgeweitete Strahl (6) trifft dann auf das Objekt (7) und wird von ihm als Objektstrahl (8) von vorne auf die Holografieplatte (12) reflektiert. Der zweite Strahl wird ebenfalls von einem Raumfilter (9) aufgeweitet und tritt als Referenzstrahl (10) von hinten auf die Holografieplatte (12), die im Überlagerungsbereich des Objekt- und Referenzstrahls (11) fixiert ist.

Der Zwei Strahl Reflektionsaufbau und der Zwei Strahl Transmissionsaufbau bestehen aus den gleichen optischen Komponenten und besitzen zwei getrennte Strahlen. Der Hauptunterschied des Zwei Strahl Reflektionsaufbaus zu dem zuvor vorgestellten Aufbau ist die Anordnung des Referenz- bzw. Objektstrahls. Beim Transmissionsaufbau treffen Referenz- und Objektstrahl auf die gleiche Plattenseite, beim Reflektionsaufbau auf verschiedene Plattenseiten. Dies führt dazu, dass das fertige Transmissionshologramm zur Betrachtung so beleuchtet werden muss, dass der Referenzstrahl durch das Hologramm transmittiert bzw. beim Reflektionshologramm der Referenzstrahl am Hologramm reflektiert wird.

Ein weiterer wichtiger Unterschied ist, dass bei Transmissionsaufbauten der Gegenstand nahezu beliebig¹¹ weit entfernt von der Platte sein kann. Bei Reflektionsaufbauten sollte im Gegensatz dazu der Gegenstand möglichst nahe an der Platte fixiert sein. Der Grund dafür wird in den Abb. 2.24 a) - d) veranschaulicht. Die Abbildungen sind Bildausschnitte des bereits vorgestellten Simulationsprogramms [HB03b] für Interferenzen. Auch hier wurden die Überlagerung einer sphärischen Objektwelle, die von (2) ausgeht, mit einer ebenen Referenzwelle, die von (1) ausgeht, berechnet.

In Abbildung 2.24 a) ist ein Reflektionsaufbau simuliert. Das Objekt (2) sitzt hier direkt an der linken Seite der Platte, so dass sich der Objektstrahl von dort ausbreitet während der Referenzstrahl sich von unten rechts ausbreitet. Im unteren Teil der Grün eingezeichneten Holografieplatte ist deutlich zu sehen, dass die Interferenzstreifen in einem Winkel von ca. 45° die Platte durchziehen. Auf diese Weise liegt eine große Anzahl an Streifen in der Platte.

Betrachtet man Abb. 2.24 b), so sieht man deutlich, dass bei dieser Simulation eines Reflektionsaufbaus bei größerem Abstand des Objektes die resultierenden Interferenzstreifen in einem sehr flachen Winkel, der bei wachsendem Abstand gegen null geht, die Platte durchziehen. Wodurch nur sehr wenige verschieden Streifen in der Platte liegen.

¹¹Unter den Einschränkungen, dass die Intensität des Objektstrahls noch hoch genug ist und die Differenz der zurückgelegten Wegstrecke von Objekt- und Referenzstrahl deutlich kleiner ist als die Kohärenzlänge.

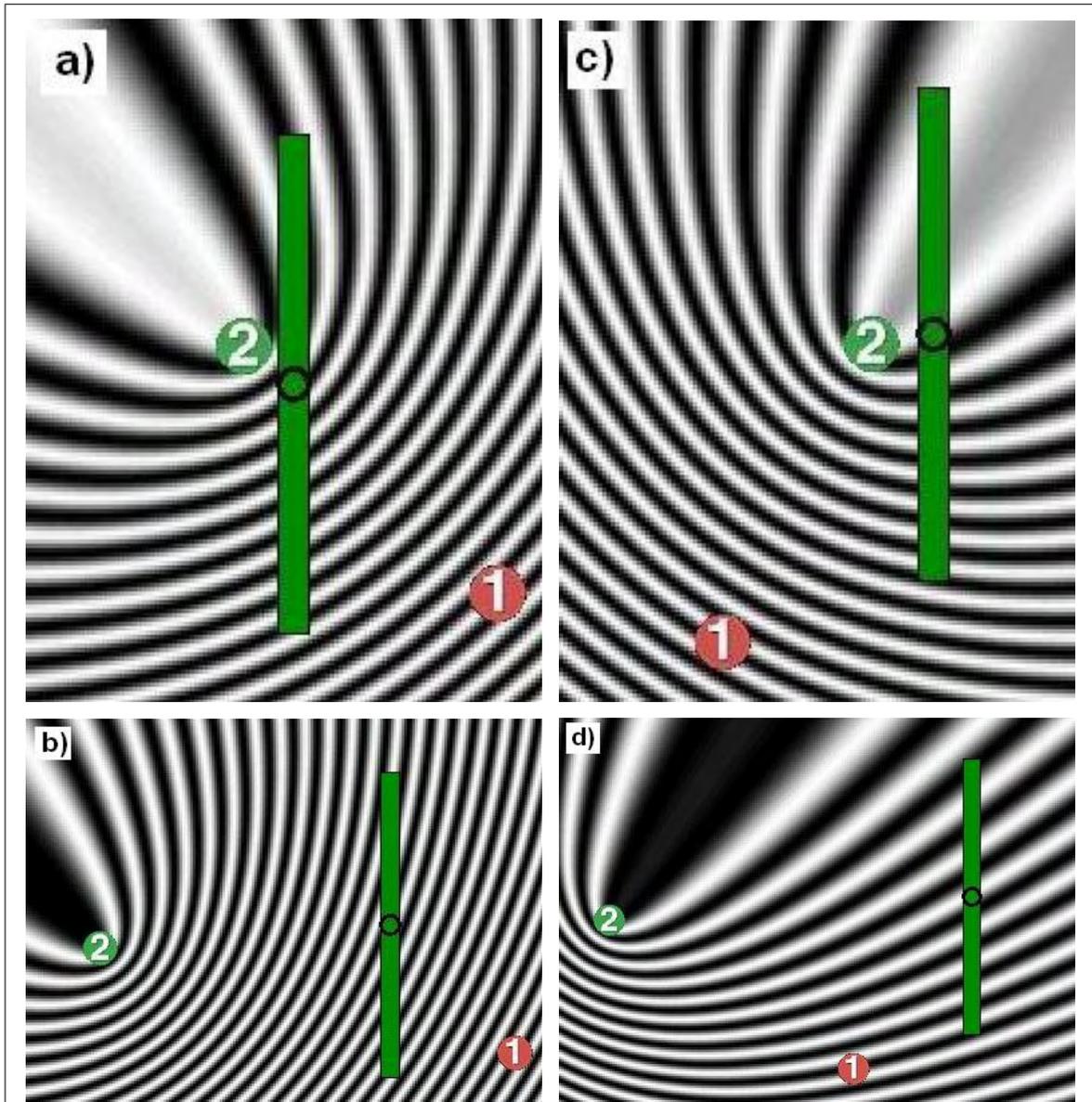


Abbildung 2.24: Ausrichtung der Interferenzstreifen bei einem (a) Reflektionsaufbau bei kleinem Abstand des Objektes zur Platte, (b) Reflektionsaufbau bei großem Abstand zur Platte, (c) Transmissionsaufbau bei kleinem Abstand zur Platte, (d) Transmissionsaufbau bei großem Abstand zur Platte. 1 bzw. 2 gibt die Position der Referenzlichtquelle bzw. die Position des Objektes an. Das Programm simuliert plane Wellenzüge für die Referenzwelle und sphärische Wellenzüge für die Objektwelle. Entnommen aus Simulationsprogramm [HB03b]

Auf diese Weise werden nur einige wenige Informationen der Objektwelle gespeichert.

D.h. bei großen Entfernungen kommt es dazu, dass die zu speichernden Informationen nicht mehr in die Emulsionsschicht „hineinpassen“. Im Gegensatz dazu spielt es bei Transmissionshologrammen Abb. 2.24 c) und d) keine Rolle, welche Entfernung das Objekt von der Platte hat. In beiden Fällen, bei kleinem Abstand c) und bei großem Abstand d), liegen die Interferenzstreifen annähernd senkrecht zur Platte, wodurch die volle Information gespeichert werden kann.

Einstrahl - Reflektionsaufbau nach Denisyuk

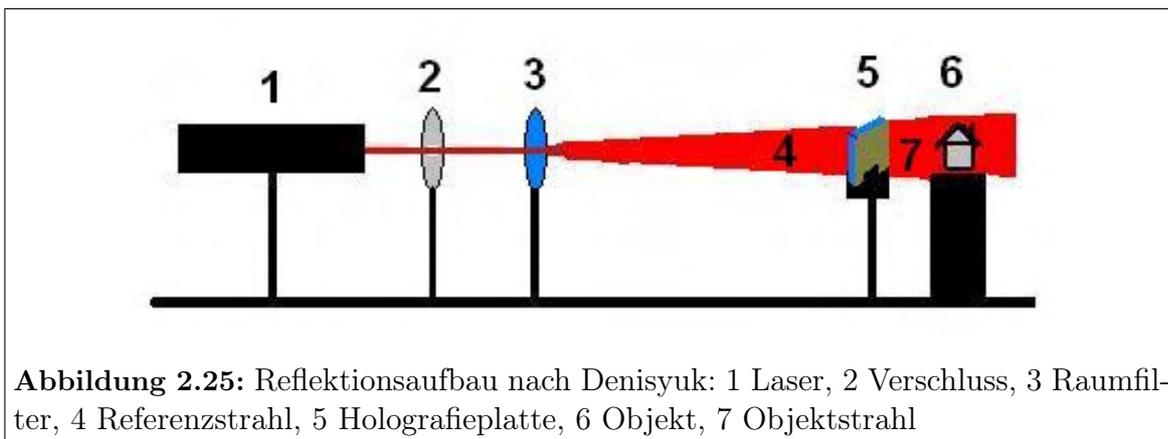


Abbildung 2.25: Reflektionsaufbau nach Denisyuk: 1 Laser, 2 Verschluss, 3 Raumfilter, 4 Referenzstrahl, 5 Holografieplatte, 6 Objekt, 7 Objektstrahl

Der in Abb. 2.25 dargestellte Aufbau geht auf Yuri Denisyuk (Kap. 2.1.1) zurück. Er zeichnet sich dadurch aus, dass hier keine offensichtliche Trennung von Referenz- und Objektstrahl vorgenommen wird, wodurch die Justage und Handhabung des Aufbaus wesentlich vereinfacht wird. Der vom Laser erzeugte Laserstrahl (1) tritt durch den Verschluss (2), wird von einem Raumfilter (3) aufgeweitet und gelangt als Referenzstrahl (4) auf die Holografieplatte (5). Da die Holografieplatte und die Emulsion durchsichtig sind, tritt der Strahl durch die Platte hindurch, trifft auf das Objekt (6) und wird von ihm als Objektstrahl (7) reflektiert, so wobei er von hinten auf die Holografieplatte (5) trifft. Die Holografieplatte ist dabei wieder in dem Bereich positioniert, indem der Referenzstrahl (4) und der Objektstrahl (7) miteinander interferieren.

Wie auch bei dem Zweistrahl - Reflektionsaufbau muss das Objekt möglichst dicht an der Platte fixiert werden. Vorteil dieses Aufbaus im Vergleich zum Zweistrahl - Reflektionsaufbau ist es, dass die Holografieplatte als Strahlteiler fungiert, so dass kein Strahlteiler und keine Spiegel benötigt werden, wodurch der Aufbau deutlich einfacher und daher sowohl leichter justierbar als auch preiswerter im Vergleich zu den anderen Aufbauten ist. Daher wurde dieser Aufbautyp schon im Rahmen der ersten PeP-Veranstaltung von Oliver Puscher für die Schülerversuche ausgewählt [Pus02].

2.3 Fachdidaktische Grundlagen zur Leistungsbeurteilung von Experimenten

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in die fachdidaktischen Grundlagen zur Leistungsbeurteilung bei Experimenten zeigt, dass sich gerade die Holografie für einen solchen Ansatz gut eignet. Das Experiment, gleich ob Demo- oder Schülerexperiment, wird trotz seiner unumstritten bedeutenden Rolle für den Physikunterricht als Mittel zur Leistungsbeurteilung sehr selten eingesetzt. Die Zahl der Experimenten aus dem Themenbereich der Sekundarstufe I und II ist sehr groß. Zur Auswahl von Experimenten, die sich für die Leistungsbeurteilung eignen, werden in Kap. 2.3.2 Leitfragen vorgestellt. An ihnen kann überprüft werden, ob ein Experiment den Anforderungen genügt, die an es zur Leistungsbeurteilung gestellt werden. Neben dem Experiment muss sich der Lehrer unter Beachtung der Situation in seiner Klasse, wie etwa dem Fachwissen und den Erfahrungen im Experimentieren, für eine angemessene Organisationsform entscheiden. Das Kapitel 2.3.3 stellt mögliche Abläufe und Organisationsformen mit ihren Vor- und Nachteilen vor und bietet so eine Entscheidungshilfe für den Lehrer. Bezug nehmend auf diese allgemeinen Kriterien wird in Kap. 2.3.4 für die Holografie dargelegt, wie eine mögliche Einordnung der Unterrichtsreihe in den Lehrplan aussehen kann, dass die Holografie für eine experimentelle Leistungsbeurteilung genutzt werden kann, welche Faszination von ihr ausgeht und wie sie so zu einer Motivation der Schüler beiträgt.

2.3.1 Nutzen der Experimente zur Leistungsbeurteilung

Zu den Zielen des Physikunterrichts gehören, neben der Vermittlung der physikalischen Grundlagen und Fakten, auch die Vermittlung von Fähigkeiten und Fertigkeiten, die für die typischen physikalischen Verfahren grundlegend sind [B⁺99]. Das Experiment ist ein solches typisches physikalisches Verfahren. Es besitzt aus diesem Grund im Physikunterricht einen besonderen Stellenwert und findet starke Beachtung in den schulischen Lehrplänen. „Dem Experiment als Bindeglied zwischen Realität und Theorie kommt daher eine zentrale Bedeutung zu.

- Es hat für die Vorstellungen, Hypothesen und Theorien bestätigenden oder falsifizierenden Charakter (Schiedsrichterfunktion).
- Es selbst produziert wiederum Phänomene (Phänomenproduzent).
- Es fördert Ideen und treibt die Theorien voran (Ideenförderer und Theorienproduzent).“

Dieses Zitat stammt aus dem rheinland - pfälzischen Lehrplan für die Physik der Sekundarstufe II ([FL⁺]). Es zeigt welche Funktionen und welche bedeutende Rolle dem Experiment in der schulischen Wissensvermittlung zukommt. Auch im hessischen Lehrplan

[Hes] wird das Experiment als „im Mittelpunkt des Unterrichts [stehend]“ beschrieben. In diesem Lehrplan wird besonders betont, dass insbesondere Schülerexperimente die Schüler fördern und Anregungen zu forschendem Lernen geben. Ähnliches findet sich in anderen Lehrplänen und fachdidaktischer Literatur wie [FL⁺, VC05, BV02a, Eng04].

Zu den zum Experimentieren grundlegenden Fähigkeiten und Fertigkeiten gehören unter anderen wichtige psychomotorische¹² und soziale Fähigkeiten. Entsprechende Kompetenzen, heute zusammen gefasst als „Soft Skills“, können also gerade auch im Physikunterricht vermittelt werden. Auch dies ist im Lehrplan [FL⁺] fest verankert: „Physiklernen findet im Unterricht immer in der Auseinandersetzung mit anderen statt. Inhaltsgebunden müssen die Schülerinnen und Schüler dabei

- sachgerecht argumentieren, debattieren und diskutieren,
- in Gruppen verantwortungsvoll zusammenarbeiten und Konflikte lösen,
- die Rolle des Gruppensprechers oder Moderators übernehmen.“

Diese Anforderungen an die Schüler werden während Schülerexperimenten in Kleingruppen im besonderen Maße angesprochen und gefordert. Je besser die Gruppe diesen sozialen Anforderungen gerecht wird, desto besser wird das Ergebnis der Gruppenarbeit ausfallen.

Im Gegensatz zu Fachdidaktikern und Fachlehrern an Schulen, ordnen Schüler dem Experimentieren und den damit verbundenen Fertigkeiten oftmals eine nebensächliche anstelle einer zentralen Rolle zu. Schüler sind aufgrund des ständigen Leistungsdrucks dazu geneigt, nur diejenigen Unterrichtsinhalte als wichtig einzustufen, die später auch in ihre Leistungsbeurteilung eingehen. Vergleicht man die Ziele des Physikunterrichts mit den Inhalten, die tatsächlich im Physikunterricht bewertet werden, so erkennt man ein starkes Ungleichgewicht zuungunsten der experimentellen Fertigkeiten [Hep02]. Dies führt dazu dass Experimente an sich und die dazu gehörenden psychomotorischen und sozialen Kompetenzen von den Schülern als völlig nebensächlich eingestuft werden. Um diesem starken und den Vorstellungen der Bildungspolitik zuwiderlaufenden Misstand entgegenzuwirken, kann der Ansatz verfolgt werden, dem Experiment auch einen Platz in der Leistungsbeurteilung zuzuordnen, der seiner Bedeutung im Physikunterricht entspricht. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der Holografie versucht werden.

Ein weiteres Argument für Experimente zur Leistungsbeurteilungen ist der ausgleichende Charakter, den sie ausüben. Sie ermöglichen es Schülern, die Schwächen im mündlichen oder schriftlichen Formulieren haben, ihre Kenntnisse zu zeigen. Häufig haben

¹²„psychomotorisch: Die Verknüpfung zwischen psychischen und motorischen Vorgängen betreffend, z.B. Tanzen oder Rad fahren“ [Lan02]

diese Schüler nicht nur schwächere Noten in den traditionell mit sprachlicher Kompetenz verknüpfte Fächer wie in den Sprachen und den Fächern der Gemeinschaftskunde, sondern auch in den Naturwissenschaften, insbesondere auch in der Physik, da sie ihre Kenntnisse sprachlich nicht präsentieren können. Mit experimentellen Leistungsbeurteilungen erhalten sie die Chance ihre physikalischen Kenntnisse und Fähigkeiten in einer anderen für sie geeigneteren Form dem Experimentieren zu zeigen, die bei rein verbalen oder schriftlichen Tests unentdeckt geblieben wären. Die experimentelle Leistungsbeurteilung bietet damit auch eine Hilfe zur Überwindung von sprachlichen Defiziten, wie sie in den Pisa-Studien immer wieder bemängelt wurden [BV02a].

Die Forderung experimentelle Leistungsbeurteilungen einzusetzen, ist in der Fachdidak nicht neu. In [B⁺99] wird z.B. auf Testverfahren zur Bewertung experimenteller Schülerleistungen eingegangen, die zwischen 1970 und 1979 veröffentlicht wurden. „Die Tatsache, daß der Physikunterricht neben Zielen des kognitiven¹³ und des affektiven¹⁴ Lernbereichs auch solche des psychomotorischen anzustreben hat, ist im allgemeinen unbestritten“ [Sch77][B⁺99]. Der Hinweis auf mögliche Testverfahren trägt jedoch den Vermerk, dass diese sich bis jetzt aufgrund des beträchtlichen Aufwandes nicht im Unterricht etablieren konnten.

Bis auf wenige Ausnahmen, gibt es nur vergleichsweise wenig Literatur zu dem Thema „Experimente zur Leistungsbeurteilung“. Dies mag unter anderem daran liegen, dass die Bewertung von Schülerleistungen beim eigenständigen Experimentieren in Deutschland erst langsam ins Blickfeld des Interesses der Fachdidaktik gelangt [Hop04]. In anderen Ländern, wie etwa Großbritannien und einigen anderen Ländern des Commonwealth, bildet hingegen der praktische Physiktest einen festen Bestandteil der zentralen Schulabschlussprüfungen [Bra02].

Aus den zuvor genannten Gründen wäre es sinnvoll das Experiment zur Leistungsbeurteilung verstärkt einzusetzen und dazu entsprechende Methoden und Vorgehensweisen zu entwickeln.

2.3.2 Anforderungen an die Experimente

Es gibt zahlreiche Experimente, doch nicht alle eignen sich gleichermaßen gut zur Leistungsbeurteilung. Bei der Auswahl stehen einige - teilweise offensichtliche - Anforder-

¹³„kognitiv: Kognitive Lernziele beschreiben alles, was mit dem Verstand erfasst wird, sowohl Faktenwissen, als auch kreative Anwendung von Wissen und das Lösen von Problemen“ [Lan02]

¹⁴„affektiv: auf die Gefühle, Werthaltungen, Einstellungen und Interessenslage einer Person bezogen. Zu den affektiven Lernzielen zählen z.B. in der beruflichen Bildung sogenannte Sekundärtugenden wie Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit und Sorgfalt, aber auch Mitgefühl und Solidarität im zwischenmenschlichen Bereich.“ [Lan02]

rungen im Vordergrund. Die Anforderungen basieren weitgehend auf Anregungen aus [Vol02, BV02a] und sollen im Folgenden in Form von Leitfragen - thematisch angeordnet - vorgestellt werden.

1. Sind genügend Versuchsanordnungen vorhanden?
2. Reicht eine Schulstunde (bzw. eine Doppelstunde) für den Versuch (Aufbau, Durchführung und Abbau) und die Bearbeitung der dazugehörigen Aufgaben?
3. Sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten den Schülern aus dem Unterricht bekannt?
4. Können sich die Schüler auf die Leistungsbeurteilung vorbereiten?
5. Kennen die Schüler die Anforderungen, die an sie gestellt werden?
6. Ist der Schwierigkeitsgrad angemessen?
7. Ist der Arbeitsablauf für die Schüler zu überblicken? Wenn nicht: Würde eine Gliederung des Arbeitsablaufs das ändern?
8. Eignet sich das Experiment zur Überprüfung der Unterrichtsinhalte?
9. Sind die geforderten Schülerleistungen beurteilbar?

Wenn es möglich ist, die Fragen dieses Katalogs positiv zu beantworten, so ist das gewählte Experiment für eine Leistungsbeurteilung geeignet. Dabei sollte zusätzlich berücksichtigt werden, ob es der erste experimentelle Test für die Schüler ist. Wenn ja, sollte besonders darauf geachtet werden, den Schülern die an sie gestellten Anforderungen vorher zu vermitteln.

2.3.3 Ablauf und Organisationsformen

In den zuvor beschriebenen Leitfragen werden auch die prinzipiellen Fragen bzgl. der ausreichenden Anzahl der Experimente, des Schwierigkeitsgrades und der zur Verfügung stehenden Zeit angesprochen. Diese hängen aber entscheidend davon ab, wie der Ablauf des Tests gestaltet wird. So muss vom Lehrer bereits im Vorfeld festgelegt werden, ob ein reiner Experimentaltest, oder ein Test mit einem experimentellen und einem „normalen“ schriftlichen Bewertungsteil, gestellt werden soll. Desweiteren ist es möglich, nur ein großes Experiment oder verschiedene kleinere Experimente zur Aufgabe zu stellen. Falls mehrere gestellt werden, muss entschieden werden, ob alle Experimente verpflichtend sind oder ob die Schüler unter verschiedenen Wahlaufgaben wählen dürfen. Bei einem Test mit schriftlichen und experimentellen Teilen ist es zusätzlich möglich, die Schüler zwischen Experiment und schriftlicher Aufgabe wählen zu lassen[BV02a].

Der Ablauf der Bewertung wird zusätzlich von der Organisationsform entscheidend beeinflusst. Der Lehrer muss daher entscheiden, ob er die Leistungsbeurteilung als Demonstrationsversuch, Schülereinzerversuch oder als Schülergruppenversuch durchführen will. Zur Verdeutlichung sollen die genannten Organisationsformen beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

Demonstrationsversuch

Der Demonstrationsversuch wird für die ganze Klasse, wie im regulären Unterricht, vom Lehrer demonstriert. Die Schüler beobachten den Versuch und bearbeiten die dazugehörigen Aufgaben wie in einem schriftlichen Test. Die Aufgaben können z.B. die Anfertigung einer Versuchsskizze, die Beschreibung der Versuchsbeobachtung oder einen Erklärungsversuch dieser Beobachtung beinhalten. Es ist außerdem möglich, Aufgaben zu stellen, in denen die Schüler eine physikalische Größe anhand der im Demonstrationsexperiment erhaltenen Daten berechnen. Aufgabenstellungen, in denen die Schüler einen passenden Graphen zu diesen Daten zeichnen, auswerten und deuten, sind ebenfalls möglich[BV02a].

In dieser Form des experimentellen Tests ist es zwar nicht möglich, die psychomotorischen Fähigkeiten der Schüler zu beurteilen, es können jedoch die Schülerleistungen bei der Versuchsbeobachtung und deren Beschreibungen überprüft werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Versuch gut sichtbar für die Klasse aufgebaut wird. Da der Versuch von der Lehrkraft durchgeführt wird, können hier Versuche zur Leistungsbeurteilung genutzt werden, die für Schülerexperimente nicht geeignet sind. Dies sind Versuche, für die ein besonders hohes Maß an Versuchsgeschick benötigt wird, die nicht in ausreichender Zahl vorhanden sind oder die als Schülerexperimente zu gefährlich sind (z.B. Versuche mit Hochspannung). Dieser Test eignet sich zudem besonders für zeitlich sehr begrenzte Tests, da wegen des fehlenden Auf- und Abbaus durch die Schüler innerhalb des Tests und der Erfahrung des Lehrers die Durchführung des Versuchs in der Regel nur wenig Zeit in Anspruch nimmt. Die Bewertung des Tests entspricht von Art und Aufwand derjenigen eines „normalen“ schriftlichen Tests und bedeutet keinen Mehraufwand für den Lehrer[BV02a].

Schülereinzerversuch

Bei Schülereinzerversuchen arbeitet jeder Schüler einzeln an einem eigenen Versuchsaufbau. Er muss also selbstständig den Versuch planen, aufbauen, durchführen, auswerten und abbauen. Dabei benötigt nicht unbedingt jeder Schüler einen eigenen Aufbau, es ist bei einem kombinierten Test ebenfalls möglich, jedem Schüler eine gewisse Arbeitszeit am Versuch zu geben, so dass z.B. drei Schüler nacheinander den selben Versuchsaufbau nutzen und in der restlichen Zeit die schriftlichen Aufgaben bewältigen.

Bei Schülerversuchen ist es im Gegensatz zu Demonstrationsversuchen möglich, die psychomotorische Schülerleistungen bei Aufbau, Durchführung und Abbau des Versuches zu bewerten. Dabei eröffnet die Einbindung einer indirekten Bewertung dieser praktischen Leistungen (z.B. richtig erhaltene Messwerte) als Indikator für eine korrekte Versuchsdurchführung die Möglichkeit, die Objektivität der Leistungsbeurteilung zu erhöhen [BV02b]. Die von den Schülern erhaltenen Messwerte lassen Rückschlüsse auf die Versuchsdurchführung der Schüler zu und können leicht zwischen „genau richtig“ und „ganz falsch“ eingeordnet werden.

Ein Nachteil des Schülereinzelsversuchs ist jedoch, dass er im Gegensatz zum Demonstrationsexperiment einen relativ hohen Zeit- und Materialbedarf hat (der wie oben beschrieben jedoch eingegrenzt werden kann). Die Einzelarbeit hat zudem den Nachteil, dass bei fehlerhaftem Experimentieren nachfolgende Aufgaben ohne Hilfestellung durch den Lehrer oft nicht gelöst werden können. Hier ist es besonders wichtig, das Experimentieren zuvor eingeübt zu haben [BV02a]. Ein weiterer Ausweg wäre, den Test in Stufen ablaufen zu lassen. Dabei werden zunächst von den Schülern Messwerte aufgenommen, die dann vom Lehrer eingesammelt werden. Daraufhin werden „richtige“ Messergebnisse ausgeteilt, auf deren Grundlage die Schüler dann weiterführende Fragen beantworten [Ost07].

Schülergruppenversuch

Bei Schülergruppenversuchen haben mehrere Schüler einen Aufbau zur Verfügung, mit dem sie gemeinsam experimentieren. Die Zusammenstellung der Gruppen kann dabei entweder durch die Schüler selbst oder durch den Lehrer vorgenommen werden. Dabei hat er die Möglichkeit, bewusst bestimmte Schüler in eine Gruppe zusammen zu setzen oder die Schüler per Los in Gruppen einzuteilen, wodurch unterschiedliche pädagogische Ziele erreicht werden können [MH05]. Aufgaben können gemeinsam gelöst werden, wobei der Lehrer entscheidet, ob er pro Gruppe oder pro Schüler eine Abgabe erwartet.

Im Gegensatz zu Schülereinzelsversuchen haben Schülergruppenversuche den Vorteil, dass die Schüler innerhalb einer Gruppe sich gegenseitig helfen können. Auf diese Weise können anspruchsvollere Experimente eher durchgeführt werden und so wird die Gefahr eingegrenzt, dass aufgrund eines nicht gelungenen Experiments die nachfolgenden Aufgaben nicht gelöst werden können. Ein anderer Aspekt betrifft die soziale Einbindung der Schüler in eine Gruppe. Dies wird von Schülern emotional positiv erlebt, was, wie einige Studien zeigen, mit besseren Leistungen verbunden ist [ML05]. Das Arbeiten in einer Gruppe gibt dem Lehrer zusätzlich die Möglichkeit, die bereits in Kap. 2.3.1 angesprochenen „Soft-Skills“ in seine Bewertung einfließen zu lassen. Die psychomotorischen Fähigkeiten der Schüler können mit geringerem Geräteaufwand als beim Schülereinzelsversuch überprüft werden. Jedoch ist bei Schülergruppenversuchen eine Bewertung der einzelnen Schülerleistungen innerhalb der Gruppe schwierig. In

der Literatur [BV02b, Hep02] wird daher eine Gruppennote vorgeschlagen, sofern sich die Gruppe nicht auffällig inhomogen verhält. Der Zeitbedarf eines Schülergruppenversuchs ist ähnlich hoch oder sogar leicht höher einzuschätzen als der eines Schüler-einzelversuchs, da trotz möglicher Aufgabenteilung der Zeitaufwand durch die nötigen Absprachen und entstehenden Diskussionen erhöht werden kann [BV02a].

Das Experiment zur Leistungsbeurteilung kann also, je nach vorgegebenen Umständen und Zielen, durch die Ausnutzung der verschiedenen Vor- und Nachteile der Organisationsformen sehr variabel und daher bei vielen verschiedenen Beurteilungssituationen eingesetzt werden.

2.3.4 Eignung des Versuchs Holografie zur Leistungsbeurteilung

Das Thema Holografie vereint eine breite Palette verschiedener Themenkomplexe des Physikunterrichts der Sekundarstufe II. Es kann im regulären Unterricht behandelt werden, wie die im Folgenden vorgenommene Einbettung des Themas in den rheinland - pfälzischen Lehrplan zeigt. Im regulären Unterricht müssen jedoch auch die vermittelten Inhalte abgeprüft werden. Hierzu eignet sich, wie dieses Kapitel zeigt, die Leistungsbeurteilung am Experiment Holografie. Abschließend wird auf das große Faszinationspotential, das die Holografie in sich birgt, und dessen Auswirkungen auf die Schülerleistungen eingegangen.

Einbettung in den Lehrplan

Die physikalischen Grundlagen der Holografie wie Huygens'sches Prinzip, Interferenz, Licht als Welle, Photoeffekt und Braggreflektion lassen sich in den Physikunterricht der Sekundarstufe II des Jahrgangs 12 oder 13, sowohl für den Leistungs- als auch für den Grundkurs einordnen. Exemplarisch wird hier eine Einbettung des Themas „Holografie“ in den rheinland - pfälzischen Lehrplan des Leistungs- und Grundkurses Physik vorgenommen.

Zum Verständnis der Abb. 2.26 bis 2.29 wird auf den Aufbau des Lehrplans eingegangen: „Der Lehrplan ist nach dem Prinzip eines Baukastens strukturiert und ermöglicht vielfältige Kombinationen von Inhalten, Methoden und Unterrichtsformen. Jeder Baustein widmet sich inhaltlich einem Teilthema. Er ist entweder als grau unterlegter Pflichtbaustein oder als nicht unterlegter Wahlpflichtbaustein ausgewiesen. Pflichtbausteine müssen behandelt werden. Die Anzahl der zu unterrichtenden Wahlpflichtbausteine ist festgelegt. Diese werden von der Lehrkraft eigenverantwortlich aus der Liste der Wahlpflichtbausteine ausgewählt „ [FL⁺].

Einbettung in den Leistungskurs

Der Wahlbaustein „Wellenoptik II“ (Abb. 2.26) des Leistungskurses beinhaltet die „technische Anwendungen der Lichtinterferenz“ und dient dem Überblick, der Erweiterung und Vertiefung. Als Beispiele hierfür werden die Holografie und die Interferometrie genannt. Im Baustein wird ausdrücklich darauf verwiesen, dass Schwerpunkte gesetzt und die Möglichkeit zur Einbindung von Schülerexperimenten genutzt werden sollen.

Wellenoptik II		10
<ul style="list-style-type: none">- Interferenzphänomene in der Natur (dünne Schichten)- technische Anwendungen der Lichtinterferenz (Holografie, Interferometrie, räumliches Filtern, ...)	<ul style="list-style-type: none">• Einen Überblick mit einem vertiefteren Einblick anhand exemplarischer Beispiele geben.• Dieser Baustein dient der Erweiterung und Vertiefung. Interessen von Lernenden und Lehrenden aufgreifen und Schwerpunkte setzen. Die Gelegenheit zur Förderung der Schülereigentätigkeit durch Schülerexperimente, Gruppenarbeit und projektartiges Arbeiten nutzen.	

Abbildung 2.26: Die Abbildung zeigt den Wahlpflichtblock „Wellenoptik II“ des Leistungskurses des rheinlandpfälzischen Lehrplans. Entnommen aus [FL⁺]

Die physikalischen Grundlagen der Holografie sind Inhalte verschiedener Pflicht- und Wahlpflichtbausteine (Abb. 2.27). Durch die Wahl des Schwerpunktes „Holografie“ im Wahlpflichtbaustein „Wellenoptik II“, ergibt sich die Möglichkeit, die bereits gelernten Inhalte „Interferenz“, „Huygensches Prinzip“, „Wellenmodell des Lichtes“, „Braggreflektion“ und „Fotoeffekt“ und aus den Pflicht- und Wahlpflichtblöcken „Mechanische Wellen“, „Wellenoptik I“, „Mikroobjekte II“ und „Mikroobjekte III“ zu wiederholen, zu vertiefen und miteinander zu vernetzen, wodurch man dem Baustein „Wellenoptik II“ als Überblicks-, Erweiterungs- und Vertiefungsbaustein im besonderen Maße gerecht wird.

Auch die im Wahlbaustein „Wellenoptik II“ vorgeschlagene Förderung der Schülereigentätigkeit kann durch geeignete Schülerexperimente zur Holografie gewährleistet werden. Innerhalb der Unterrichtsreihe zur Holografie kann dabei das Prinzip der Interferometrie, das ebenfalls als Beispiel vorgeschlagen ist, besprochen und sogar im Schülerexperiment erarbeitet werden. Die Holografie kann wie gezeigt wurde äußerst gut in den Lehrplan eingebettet werden und ist daher als Unterrichtsreihe im Leistungskurs hervorragend geeignet.

Mechanische Wellen		10
<ul style="list-style-type: none"> - Entstehung und Ausbreitung von Wellen - Beschreibende Größen und Wellengleichung - Interferenz; Huygens'sches Prinzip - stehende Wellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ein solides Grundwissen vermitteln. • Im Gegensatz zum Grundfach sind hier vertiefende Übungen zu empfehlen. Es kann auch sinnvoll sein, interaktive Computersimulationen zu nutzen. • Praktikum: Stehende Wellen 	
Wellenoptik I		10
<ul style="list-style-type: none"> - Doppelspaltexperiment und Wellenmodell des Lichts - Auflösungsvermögen - Polarisation - elektromagnetisches Spektrum 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Vertrautheit mit dem Wellenmodell herstellen und dessen Anwendung auf Lichtphänomene fördern. • Ergänzend oder ersatzweise sind unter Beachtung des Zeitrahmens auch andere Experimente möglich (Fresnelspiegel, Einfachspalt, Gitter,...). Eine evtl. Fortführung in dem Wahlbaustein Wellenoptik II bedenken. 	
Mikroobjekte II		10
<ul style="list-style-type: none"> - Braggreflexion; Elektronenbeugung - Röntgenstrahlung; Grenzwellenlänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch experimentelles Arbeiten den Beschäftigungsgrad erhöhen. • Dieser Baustein ist eine experimentelle Vertiefungsinsel zu den Bausteinen Mikroobjekte I und Mikroobjekte III. 	
Mikroobjekte III		10
<ul style="list-style-type: none"> - Fotoeffekt - Comptoneffekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Solide Kenntnisse über experimentelle Befunde bereitstellen und Fertigkeiten im formalen Umgang fördern. • Die Effekte als die Formen der Photon-Elektron-Wechselwirkung verdeutlichen. Beim traditionellen Einstieg in die Quantenphysik über den Fotoeffekt müsste dieser vorgezogen werden. 	

Abbildung 2.27: Die Abbildung zeigt diejenigen Pflicht- (grau hinterlegt) bzw. Wahlbausteine (weiß hinterlegt) des rheinland - pfälzischen Lehrplans für den Leistungskurs die das Thema Holografie miteinander vernetzt. Entnommen aus [FL⁺]

Einbettung in den Grundkurs

Auch im Lehrplan des Grundkurses ist die Holografie enthalten. Im Wahlbaustein „Wellenoptik“ (Abb. 2.28) wird die Holografie als Beispiel eines Interferenzphänomens vorgeschlagen.

Wellenoptik		10
<ul style="list-style-type: none">- Licht als Welle- Interferenzphänomene (Auflösungsvermögen, dünne Schichten, Holographie, ...)	<ul style="list-style-type: none">• Inhaltliche und erkenntnistheoretische Vertiefungen und Ergänzungen im Sinne einer intensiveren Durchdringung und Vertrautheit anstreben.• Dieser Baustein ermöglicht in Kombination mit den Bausteinen Wellen und Mikroobjekte I eine umfassende Behandlung des Themas Licht.• Praktikum: Wellenlängenbestimmung	

Abbildung 2.28: Im Pflichtbaustein „Wellenoptik“ wird die Holografie als Beispiel eines Interferenzphänomens vorgeschlagen. Entnommen aus [FL⁺]

Die Grundlagen der Holografie sind dabei wiederum in anderen Bausteinen des Lehrplans zu finden. So gehören die Inhalte „Wellenmodell des Lichts“, „Interferenz“ und das Wellenphänomen „Huygens’sches Prinzip“ zu dem Pflichtbaustein „Wellen“. Während sich der „Fotoeffekt“ im Pflichtbaustein „Mikroobjekte I“ befindet. Der im Grundkurs nicht immer durchgeführte Wahlpflichtbaustein „Mikroobjekte II“ beinhaltet die „Braggreflektion“¹⁵(Abb. 2.29).

Im Grundkurs verbindet, wie auch für den Leistungskurs schon gezeigt wurde, eine Unterrichtsreihe zur Holografie, mehrere Pflicht- und Wahlpflichtbausteine. Die Aufgabe des Wahlbausteins „Wellenoptik“ zur „Vertiefung und Ergänzung“ zu dienen, kann daher gut mit einer Unterrichtsreihe zur Holografie erfüllt werden.

Erfüllung der Anforderungen von Experimenten zur Leistungsbeurteilung

Das Thema Holografie bietet neben der Wiederholung, Verknüpfung und Vertiefung physikalischer Inhalte auch die Möglichkeit zur experimentellen Leistungsbeurteilung. Im Folgenden soll anhand der in Kap. 2.3.2 enthaltenen Leitfragen die Eignung der Holografie als Experiment zur Leistungsbeurteilung diskutiert werden.

¹⁵Hier sei erwähnt, dass es auch möglich ist ohne Braggreflektion eine Unterrichtsreihe zur Holografie durchzuführen. Allerdings muss dann auf die Winkelabhängigkeit der Hologrammfarbe verzichtet werden. Siehe Unterrichtsreihe im Grundkurs Kap. 4.1.2.

Wellen		10
<ul style="list-style-type: none"> - Wellenphänomene und beschreibende Größen; Interferenzprinzip - Licht als Welle; Doppelspaltexperiment - elektromagnetisches Spektrum 	<ul style="list-style-type: none"> • Formale und begriffliche Grundkenntnisse bereitstellen. • Beabsichtigte Vertiefungen, Ergänzungen und Praktika sind mit den entsprechenden Wahlbausteinen möglich. Eine informative Darstellung des elektromagnetischen Spektrums ist ausreichend. 	
Mikroobjekte I		10
<ul style="list-style-type: none"> - quantenmechanisches Verhalten von freien Elektronen und von Photonen am Doppelspalt - De-Broglie-Beziehung - h-Bestimmung; Fotoeffekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Die quantenphysikalische Denkweise als Fundament naturwissenschaftlicher Bildung aufzeigen. • Bestätigung der Einstein-Gleichung durch den Fotoeffekt. 	
Mikroobjekte II		10
<ul style="list-style-type: none"> - experimentelle Belege (Bragg-Reflexion, Elektronenbeugung, Grenzwellenlänge) - Heisenberg'sche Unschärferelation - Interpretationen der Quantenphysik 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimentelle und erkenntnistheoretische Vertiefungen der quantenphysikalischen Denkweise vornehmen. • Den Zeitrahmen durch eine exemplarische Behandlung der experimentellen Befunde wahren. Die Problematik der Interpretation auf der Basis der experimentellen Befunde am Doppelspaltexperiment thematisieren. 	

Abbildung 2.29: Die Abbildung zeigt diejenigen Pflicht- (grau hinterlegt) bzw. Wahlbausteine (weiß hinterlegt) des rheinlandpfälzischen Lehrplans für den Grundkurs die das Thema Holografie miteinander vernetzt. Entnommen aus [FL⁺]

Beginnen wir dabei mit den prinzipiellen Abwägungen zur Versuchsdurchführung. In der Regel sind Versuchsanordnungen zur Holografie nicht oder in nicht ausreichender Zahl an Schulen vorhanden. Um eine positive Beantwortung der ersten Leitfrage zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit ein kostengünstiger Aufbau (Kap. 3.2) entwickelt, der leicht durch einen Lehrer oder von Schülern selbst gebaut werden kann. Zusätzlich wurden Versuche ausgewählt und dazugehörigen Aufgaben (siehe Anhang) entwickelt, die in einer Doppelstunde (Kap. 4.2) zu bewältigen sind, wodurch auch das zweite Kriterium erfüllt wird. Dabei wurde darauf geachtet, dass mögliche abzu prüfende Inhalte ihre Berechtigung durch den Lehrplan finden und dass

die Versuche auch mit dem kostengünstigen Schülerholografieaufbau mit ausreichend guten Ergebnissen realisierbar sind.

Zur Durchführung der ausgewählten Versuche und Beantwortung der erstellten Fragen sind in allen Fällen hinreichende Kenntnisse der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten notwendig. Diese Grundlagen sind, wie in der dritten Leitfrage gefordert, Inhalt der vorangehenden Stunden der Unterrichtsreihe¹⁶.

Zur Vorbereitung auf die Leistungsbeurteilung (siehe vierte Leitfrage) können die Schüler beispielsweise das speziell hierfür entwickelte Schülerskript, welches sich ebenfalls im Anhang befindet, als auch die darin enthaltene Gliederung zum Arbeitsablauf nutzen. Die Schüler werden in den vorhergehenden Stunden über die kognitiven, psychomotorischen und sozialen Anforderungen, die an sie während des Test gestellt werden, informiert, so dass auch das fünfte Kriterium erfüllt wird.

Der Schwierigkeitsgrad der einzelnen praktischen Arbeitsschritte (Bedienung und Justage der Laserdiode, Aufweitung des Strahls mit der Linse, Umgang mit den Platten, Entwicklung der Platten etc.) ist für Schüler der Oberstufe angemessen (siehe Leitfrage sechs). Durch die großen Fülle von sehr unterschiedlichen Arbeitsschritten (vgl. Kap. 4.2), ist bei der ersten Nutzung des Versuchsaufbaus der Arbeitsablauf für die Schüler jedoch schwer zu überblicken. Eine in der vorhergehenden Stunde ausgeteilte Gliederung (Kap. 4 des Schülerskripts im Anhang), die die Schüler auch während des Versuches nutzen dürfen, erleichtert den Überblick erheblich, so dass auch dem siebtem Kriterium genüge getan wird.

Die in Leitfrage acht geforderte Überprüfungsmöglichkeit der zuvor behandelten Unterrichtsinhalte durch den experimentellen Test, ist durch den schriftlichen Bewertungsteil gegeben indem die Kernpunkte der behandelten Unterrichtsinhalte überprüft werden. Neben der Überprüfung dieser kognitiven Inhalte eignet sich das relativ komplexe Experiment Holografie zusätzlich, um psychomotorische und soziale Fähigkeiten der Schüler zu überprüfen. Durch die vielen durchzuführenden Arbeitsschritte ist eine Zusammenarbeit der Schüler nötig, so dass bei der Versuchsdurchführung das Gelingen nicht nur von psychomotorischen sondern auch der sozialen Faktoren beeinflusst wird. Dadurch ist es möglich, auch diese Schülerleistungen in die Benotung einfließen zu lassen. Im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit wurde ein Bewertungsbogen (Kap. 4.1) entwickelt, um die in Leitfrage neun verlangte Beurteilung der praktischen Leistungen der Schüler zu ermöglichen.

Die in Kap. 2.3.2 vorgestellten Leitfragen, können alle positiv beantwortet werden. Der

¹⁶Eine solche, auf das erwünschte Unterrichtsziel ausgelegte, Planung des Unterrichts wird in der didaktischen Literatur mit „vorauslaufendem Unterricht“ bezeichnet [BH98].

Versuch „Holografie“ erfüllt daher sehr gut die Anforderungen, um zur Leistungsbeurteilung genutzt werden zu können. Dies wurde im Rahmen der vorliegenden Staatsexamensarbeit auch in der Schulpraxis durch Unterrichtsreihen erfolgreich erprobt (Kap. 4.1).

Faszinationspotential der Holografie

Als letzter aber dennoch entscheidender Aspekt sei das Faszinationspotential der Holografie erwähnt. Die Holografie ist im Schüleralltag allgegenwärtig. Jeder Schüler hat schon einmal ein Hologramm in der Hand gehabt und betrachtet. Auf Geldscheinen, Personalausweisen, auf DVD's und auf Fanartikeln der Fußballweltmeisterschaft 2006 findet man sie als Sicherheitsmerkmal. Man kann sie in Geschenkläden als eindrucksvolle Bilder, als Schmuckbroschen oder als Aufklebefolien z.B. für das Handy kaufen. In Museen und Science Centern werden eindrucksvolle, riesige, künstlerische und sehr effektvolle Hologramme mit den unterschiedlichsten Eigenschaften ausgestellt. Doch obwohl jeder Hologramme kennt, wissen nur wenige, dass die Holografie einen immer größeren Stellenwert, auch in den bereits genannten Anwendungen etwa der Forschung, Sicherheitstechnik und Medizin, einnimmt bzw. was physikalisch dahinter steckt. Und so bleiben viele Fragen bei den Schülern offen:

- Wieso sind Hologramme dreidimensional?
- Warum werden sie auf Geldscheine geprägt und warum schillern viele Hologramme in den Regenbogenfarben?
- Wie sieht ein Holografie-Aufbau aus?
- Wie werden Hologramme hergestellt und kann man sie auch selbst herstellen?

Diese Punkte mögen ein Grund für das große Faszinationspotential, das die Holografie besitzt, sein.

Darüber hinaus üben Hologramme und damit die Holografie aber auch aufgrund ihrer „mystischen“ Erscheinungsweise eine große Faszination auf Menschen aus. Die Gründe dafür liegen wohl zum Großteil daran, dass Illusionen, die man sich nicht direkt erklären kann, eine gewissermaßen „magische“ Anziehungskraft entwickeln. Das Interesse, einer solchen Illusion wie der Holografie auf die „Schliche“ zu kommen, ist besonders groß. So empfanden die Teilnehmer des Schülerpraktikums PeP, das im Jahr 2002 im Rahmen der Staatsexamensarbeit von Oliver Puscher entwickelt und durchgeführt wurde, nach eigenen Aussagen von allen behandelten Themen zur Optik gerade die Holografie als „besonders faszinierend“. Auch fand das eigenständige Experimentieren, speziell die Aufnahme von Hologrammen, besonders viel Gefallen bei den Schülern [Pus02]. Beim Wissenschaftsmarkt der Universität Mainz im Jahr 2005, bei dem unter dem Motto



Abbildung 2.30: Holografie übt eine große Faszination auf Menschen aus, so dass der Stand „Faszination Holografie“ beim Wissenschaftsmarkt 2005 ständig mit Menschen überfüllt war.

„Faszination Holografie - Wir bringen das Labor in die Stadt!“ vor Ort Hologramme in kleinen Führungen hergestellt wurden, waren bereits Samstags morgens alle Termine für beide Veranstaltungstage ausgebucht und der Stand durchgängig mit Menschen überfüllt (Abb. 2.30). Zudem ist die Holografie eines der am stärksten angefragten Schülerprojekte der Arbeitsgruppe LARISSA des Instituts für Physik an der Johannes Gutenberg - Universität Mainz.

Dies zeigt, welch großes Faszinationspotential die Holografie in sich birgt. Da positive Emotionen wie Motivation und Interesse im direkten Zusammenhang mit dem Lernerfolg stehen [ML05], ist dementsprechend gerade die Holografie geeignet als ansprechendes Unterrichtsthema eingesetzt zu werden und eine positive Resonanz in der Schülerwahrnehmung des naturwissenschaftlichen Unterrichts zu finden.

3 Holografieaufbau für die Schule

Für den Einsatz von Versuchen zur Holografie in der Schule war es nötig, einen Holografieaufbau zu finden, dessen Bestandteile leicht erhältlich, möglichst robust und besonders kostengünstig sind. Zusätzlich sollen die Schüler ihre fertigen Hologramme auch zu Hause im weißen Licht einer Halogenlampe betrachten können, wozu eine Reflektionsanordnung gewählt werden muss (siehe Kap. 2.1.5). In diesem Kapitel werden zunächst zwei kommerziell erhältliche Holografieaufbauten vorgestellt (Kap. 3.1). Basierend auf den gemachten negativen Erfahrungen mit einem der vorgestellten kommerziellen Aufbauten wurde ein eigener Holografieaufbau entwickelt, der die oben genannten Anforderungen erfüllt. Dieser wird in Kap. 3.2 beschrieben. Die für die Schülerversuche nötigen Vorbereitungen werden am Ende dieses Kapitels (Kap. 3.3) erläutert.

3.1 Komerzielle Holografieaufbauten

Für den Einsatz in der Schule wurden zunächst kommerzielle Aufbauten gesucht. Die Leybold Didactic GmbH bietet z.B. einen kompletten Holografieaufbau inklusive Holografiefilmen und Chemikalien, allerdings ohne Entwicklungswannen, zu einem Preis von 4812,36 € an. Damit ist der Ansatz, die Schüler mit eigenen Aufbauten Hologramme herstellen zu lassen, schon aus Kostengründen für eine Schule nicht zu realisieren.

Ein weiteres kommerzielles Angebot - preislich um ein Vielfaches günstiger - wie das „HoloKit“ der Firma 3D-Lab ist für 99 € - 199 € erhältlich und beinhaltet u.a. eine fokussierbare Laserdiode, Holografiefilme bzw. Platten, die nötigen Chemikalien, eine Wäscheklammer, und drei kleine Plastikbecken. Stative oder ähnliches sind im Kit nicht enthalten, werden aber auch nicht benötigt. Der Aufbau wird stattdessen mit Haushaltsgegenständen, wie auch in [Sax04] vorgeschlagen, realisiert. Dies bedeutet, dass eine gewöhnliche Kaffeetasse mit Sand gefüllt und auf ein umgedrehtes Bierglas gestellt (Abb. 3.1) wird. Die mit einer Batterie betriebene Laserdiode wird mit der Wäscheklammer fixiert, wobei die Wäscheklammer in den Sand gesteckt und an den Tassenrand gelehnt wird. Mit der integrierten Linse der Laserdiode kann der Strahl direkt aufgeweitet werden um das gesamte Objekt auszuleuchten. Das Objekt wird auf ein Mousepad, das der Schwingungsisolierung dient, gelegt. Die Holografieplatte wird wiederum direkt auf das Objekt gelegt.



Abbildung 3.1: Der aus Haushaltsgegenständen realisierte Einstrahl - Reflektionsaufbau ist sehr instabil. Aus [3D 04]

Dieser Einstrahl - Reflektionsaufbau¹, der mit wenigen und dabei sehr einfachen Komponenten auskommt, erschien für den Einsatz in der Schule bestens geeignet. Leider war die Qualität der einzelnen Komponenten nicht überzeugend.

Die erfolgreiche Herstellung von Hologrammen hängt entscheidend davon ab, dass sich

¹Siehe: „Anordnungen zur Aufnahme von Hologrammen“ Kap. 2.2.3

während des Versuchs der Aufbau nicht bewegt². Eine Kaffetasse auf einem umgedrehten Bierglas ist jedoch recht instabil, so dass erfolgreiche Aufnahmen in einem Raum, der durch typischerweise zwölf bis achtzehn experimentierende und herumlaufende Schüler ständig in Unruhe und Schwingung versetzt wird, unwahrscheinlich sind.



Abbildung 3.2: Die Platine der Laserdiode des HoloKits ist nicht durch ein Gehäuse geschützt.

Die zweite Unzulänglichkeit betrifft die Laserdiode. Die Leistung der im HoloKit enthaltenen Laserdiode liegt zwischen 3 bis 4 mW und gehört damit zur Laserklasse 3, die in Schulen nach den Sicherheitsrichtlinien [Kul03] nicht eingesetzt werden dürfen. Außerdem besitzt sie, wie in der Abb. 3.2 zu sehen ist, kein Gehäuse, so dass die zugehörige Platine ungeschützt heraussteht. Die Lebenserwartung der Diode, die als Komponente eines Schülerexperimentes dienen soll, wäre daher recht kurz. Desweiteren zeigt der aufgeweitete Laserstrahl starke Störungen durch Interferenzstreifen und Ringe, die sich sowohl auf die Diode selbst als auch auf die Linse zurückführen lassen und in Tests auch auf den mit ihr hergestellten

Hologrammen deutlich zu sehen waren. Auch die mitgelieferten Plastikwannen hätten bei regelmäßiger Benutzung keine hohe Lebenserwartung in einer Schule, da sie sehr dünnwandig sind. Sie sind daher sogar für ihren eigentlichen Zweck, die Hologramme darin zu schwenken, eher unbrauchbar.

3.2 Schulaufbau

Basierend auf den Erfahrungen mit den kommerziell erhältlichen Versuchsansordnungen entstand im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit der in der Abb. 3.3 gezeigte Schulaufbau³.

Die erhöhte Position der Laserdiode wurde, wie in Abb. 3.3 gezeigt, mit einem kostengünstigen und in jedem Baumarkt erhältlichen gewöhnlichen Abflussrohr mit passendem Stopfen realisiert. Das Rohr wird dabei komplett mit Sand gefüllt, wodurch das Rohr sehr schwer und daher standsicher ist. Der Sand dient dabei nicht nur als Ballast,

²Bei der Holografie wird, wie bereits in Kap. 2.1.4 erklärt, die Intensität des Interferenzmusters gespeichert. Bewegt sich die Aufnahmeanordnung, so verändert sich das Interferenzmuster, es werden Stellen belichtet, die nicht belichtet werden sollten und umgekehrt, so dass die Information nicht gespeichert werden kann. Im Gegensatz zu einer normalen Fotografie entsteht dadurch kein verwackeltes Bild, sondern gar keins.

³Die Benutzung des Aufbaus ist im Schülerskript Kap.4 bzw. in den Arbeitsblättern der Leistungsbeurteilung (siehe Anhang) erklärt.



sondern auch gleichzeitig als Schwingungsisolierung.

Als Lichtquelle wird ein kostengünstiges Lasermodul⁴ der Laserklasse 2 (mit einer Laserleistung von $<1\text{mW}$) genutzt, welches nach den Sicherheitsrichtlinien ([Kul03]) zum Einsatz in der Schule zugelassen ist. Das Lasermodul besitzt ein geschlossenes Gehäuse, so dass es unempfindlich ist. Die fokussierbare Linse befindet sich in einem robusten Aufsatz, der mit einem Gewinde mit dem Gehäuse verbunden ist und deren Position durch Drehen des Aufsatzes verändert werden kann. Die Spannungsversorgung wird mit zwei handelsüblichen AA Batterien (1,5V) realisiert. Dabei hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die beiden Batterien in eine Batteriehalterung einzusetzen und sie über einen Batterieclip mit dem Lasermodul zu verbinden (Abb. 3.3 rechts). Zur Fixierung des Lasermoduls im Abflussrohr wird es in eine Reagenzglasklammer eingespannt, die wiederum mit ihrem langen Griff gut im Sand des Abflussrohrs Halt findet, ohne dass sie an den Rand des Rohres angelehnt werden muss⁵.

Wie in Abb. 3.5 dargestellt, wird das Objekt auch bei diesem Aufbau zur Schwingungsisolierung auf ein Mousepad gelegt. Zusätzlich wird dieses Mousepad mit Alufolie umwickelt, wodurch das fertige Hologramm durch den sichtbaren Hintergrund eine größere räumliche Tiefe zu besitzen scheint. Die Holografieplatte wird so auf das Objekt gelegt, dass sie nicht wackelt und komplett vom aufgeweiteten Laserstrahl ausgeleuchtet wird. Auch das Objekt muss, wie in Kap. 2.1.4 beschrieben, vollständig ausgeleuchtet sein. Dies kann mit einer Testplatte (einer Glasplatte in der Größe der Holografieplatte) ausprobiert werden.

⁴Fabrikat und Hersteller sind im Anhang in der Kostenaufstellung angegeben

⁵Da die Klammer keinen direkten Kontakt mit dem Rohr aufweist, können so keine Schwingungen, die vom Tisch auf das Rohr übertragen werden, auf die Diode übertragen werden (siehe Abb. 3.4).

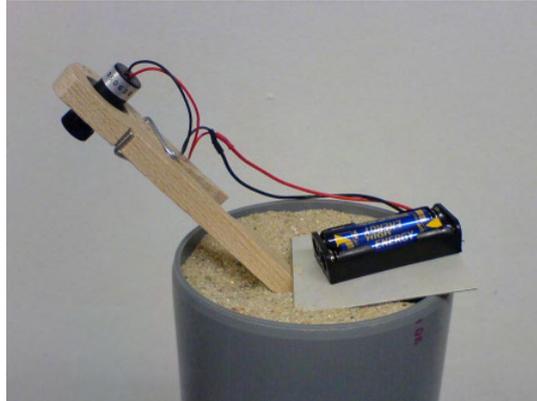


Abbildung 3.4: Die Reagenzglasklammer findet im Sand soviel Halt, dass sie nicht an den Rand des Rohrs gelehnt werden muss.

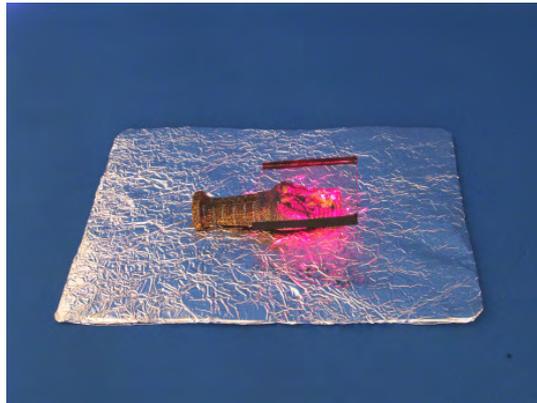


Abbildung 3.5: Das Objekt wird zur Schwingungsisolierung auf ein mit Alufolie umhülltes Mousepad gelegt. Die Holografieplatte wird direkt auf das Objekt gelegt.

Zu dem Aufbau gehört außerdem eine schwarze Pappe, die zwischen das Rohr und das Objekt aufgestellt werden kann und die Holografieplatte vor ungewollter Belichtung durch den Laser schützt. Zur Belichtung wird die Pappe dann für eine bestimmte Zeit, je nach Leistungsdichte an der Holografieplatte zwischen einer und fünf Sekunden, aus dem Strahlengang herausgenommen (siehe Kurzanleitung im Schülerskript und Aufgabe vier der ersten Leistungsbeurteilung).

Zur Entwicklung der Hologramme werden Entwicklungsbecken benötigt. Hier eignen sich besonders Laborschalen⁶, wie sie auch zur Fotoentwicklung genutzt werden. Für die

⁶Bei der Anschaffung sollte darauf geachtet werden, nicht zu große Schalen zu kaufen, da sonst unnötig viel Flüssigkeit genutzt werden muss, um die Holografieplatten vollständig zu überdecken.

anschließende Wässerung der Holografieplatten werden große Wasserbecken benötigt. Dazu eignen sich vollgelaufene Waschbecken, große Wassereimer oder große Laborschalen wie die in Abb. 3.6.



Abbildung 3.6: Zur Wässerung der Holografieplatten eignen sich unter anderem große Entwicklungsbecken.

Zum Trocknen der Platten werden Papiertücher und ein Föhn, mit Kaltluftstufe⁷, benötigt. Desweiteren sind Kittel, Handschuhe und Trichter zum Zurückfüllen des Bleich- und Stoppbades in die Flaschen erforderlich⁸.

Alles in allem ist es so möglich, einen kompletten Aufbau (ohne Verbrauchsmaterialien wie Holografieplatten, Entwicklungsbäder, Küchentuch und Handschuhe) für nur 42,70 € pro Stück zu kaufen. Eine Aufstellung der Kosten und Hersteller für die benötigten Komponenten des Aufbaus und die Verbrauchsmaterialien befindet sich im Anhang.

3.3 Vorbereitung der Schülergruppenversuche

Die Durchführung der Leistungsbeurteilung zur Holografie bedarf, selbst wenn alle Aufbauten und das nötige Zubehör vorhanden sind, einer Vorbereitung durch den Lehrer.

Zu allererst müssen geeignete Räumlichkeiten für den Versuch gefunden werden. Es werden zwei möglichst direkt nebeneinanderliegende Räume benötigt, von denen einer als Dunkelkammer und der andere als „heller Raum“ fungieren kann. Der helle Raum kann relativ klein sein. In ihm werden Halogenlampen aufgestellt, mit denen die Schüler sich ihre entwickelten Hogramme anschauen können. Die Dunkelkammer ist deutlich

⁷In den meisten Kursen gibt es Schüler (meist Schülerinnen), die einen geeigneten Fön mitbringen können.

⁸Kittel und Trichter müssen dabei nicht gekauft werden, sie können z.B. aus der Chemiesammlung ausgeliehen werden, sofern sie in der Physiksammlung nicht vorhanden sind.

anspruchsvoller. Sie muss groß genug sein, um dem gesamten Kurs das Arbeiten an den Aufbauten zu ermöglichen und es darf kein Tageslicht⁹ eindringen. Optimal ist ein Kellerraum, da dieser sehr schwingungsarm ist.

Vor der ersten Durchführung sollte unbedingt getestet werden, ob genügend Grünlichtlampen vorhanden sind, damit eine ausreichende Helligkeit zum Arbeiten besteht. Dabei sind teure Grünlichtlampen für Dunkelkammern bei der Nutzung von BB 640 Holografieplatten unnötig. Es reichen gewöhnliche, grüne 25 W Partybirnen.



Abbildung 3.7: Türschleuse

Um ein Betreten und Verlassen der Dunkelkammer ohne Gefahr für die lichtempfindlichen Holografieplatten zu ermöglichen, muss eine Türschleuse installiert werden. Im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit wurde dafür eine kostengünstige, einfache Schleuse (Abb. 3.7) entwickelt, die leicht gebaut werden kann. Dazu wird ein Vorhang aus Teichfolie zugeschnitten, der dann mit Hilfe von in den Vorhang ausgeschnittenen kreisrunden Löchern auf eine Duschvorhangstange aufgefädelt wird. Die Duschvorhangstange kann dann, durch die enthaltene Feder, per Druck im Türrahmen eingespannt werden. Auf der Tür abgewandten Seite, sollte wie im rechten Bild von Abb. 3.7 gezeigt, zusätzlich ein Stück Teichfolie an den Rahmen geklebt werden, um das Durchdringen von Licht durch die Aufhängelöcher zu verhindern. Die Nutzung dieser Schleuse ist dabei recht einfach. Möchte man von einem hellen Raum in einen dunklen gehen, öffnet man die Tür und stellt sich in den Türrahmen zwischen geschlossenem Vorhang und Tür¹⁰. Schließt man darauf die Tür, kann durch den Vorhang die Dunkelkammer ohne Fehlbelichtungen der Holografieplatten betreten werden.

⁹Falls Fenster durch Rolläden oder Jalousien nicht ganz lichtdicht schließbar sind, bieten sich dichte schwarze Vorhänge oder Teichfolie zur vollständigen Abdunkelung an.

¹⁰Beim Zuschneiden der Folie sollte darauf geachtet werden, dass der Vorhang ca. 50 cm länger als

Sind geeignete Räume gefunden und eine Türschleuse gebaut, müssen für jeden Versuchstag nun die Holografieplatten, wie bereits in Kap. 2.1.4 beschrieben, in der Dunkelkammer vorgequollen werden, um die Lichempfindlichkeit der Holografieplatten zu erhöhen. Eine Anleitung dazu befindet sich im Anhang. Zudem ist es sinnvoll, alle Entwicklungsbäder (Entwicklungs-, Stopp- und Bleichbäder) so in Flaschen abzufüllen, dass die Bäder von den Schülern komplett in die dafür vorgesehenen Becken gefüllt werden können. Das Entwicklungsbad sollte dabei gebrauchsfertig, d.h. verdünnt, abgefüllt werden, um Zeit während der Versuche zu sparen. Dasselbe gilt für das Stoppbad, das aus einer 3% Essigsäure besteht. Während der Durchführung ist es eine weitere Hilfe, wenn alle benötigten Geräte¹¹ z.B. auf einen Rollwagen bereit gelegt werden.

die Türhöhe und ca. 1m breiter als die Türbreite ist. Dadurch kann sich der Vorhang „ausbeulen“ wenn eine Person im Zwischenraum steht, ohne dass eine Lücke zwischen Vorhang und Türrahmen entsteht.

¹¹Eine Materialien - Checkliste befindet sich ebenfalls im Anhang.

4 Praxis - Holografie in der Schule

4.1 Konzeption und Materialien

Im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit wurde eine Unterrichtsreihe konzipiert und am Wiesbadener Gymnasium „Gutenbergschule“ sowohl in einem Grundkurs Physik als auch in einem Leistungskurs Physik, durchgeführt. Um einen Überblick zu geben wird in diesem Kapitel zunächst das verwendete Konzept der Unterrichtsreihe und der Leistungsbeurteilung (Kap. 4.1.1) vorgestellt. Darauf folgen Darstellungen der Inhalte der Unterrichtsreihe für Grund- und Leistungskurs (Kap. 4.1.2 und Kap. 4.1.3) sowie eine Vorstellung der zu diesem Zweck entwickelten Arbeitsblätter (Kap. 4.1.4) und des Bewertungsbogens (Kap. 4.1.5), mit denen sowohl kognitive, als auch psychomotorische und soziale Leistungen der Schüler festgestellt werden können.

4.1.1 Konzept der Unterrichtsreihe und der Leistungsbeurteilung

Wie in Kap. 2.3.4 dargestellt, eignet sich der Versuch zur Holografie zur Leistungsbeurteilung. Die Leistungsbeurteilung wird in eine Unterrichtsreihe eingebettet, die dem Wahlbaustein „Wellenoptik“ im Grundkurs bzw. „Wellenoptik II“ im Leistungskurs zugeordnet werden kann. Die Unterrichtsreihe zielt auf eine fachliche Vertiefung, Verknüpfung und Beurteilung der genannten physikalischen Hintergründe der Holografie ab. Dabei sind die Inhalte der Unterrichtsreihe auf die benötigten Inhalte für die Leistungsbeurteilung abgestimmt. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die Förderung und Beurteilung psychomotorischer und sozialer Leistungen gelegt.

Als Organisationsform der Leistungsbeurteilung wurde der Schülergruppenversuch (Kap. 2.3.3) gewählt, da Integration der sozialen Fähigkeiten gewünscht war. Eine Zusammenstellung der Gruppen per Los erhöht dabei die sozialen Herausforderungen für die Schüler. Zur Holografie bieten sich Gruppengrößen von zwei bis drei Schülern an. Innerhalb der Gruppen wird gemeinsam der Versuch aufgebaut, geplant, durchgeführt und später wieder abgebaut. Während des Versuches wird außerdem ein schriftlicher Test zum Versuch geschrieben, indem hauptsächlich kognitive, aber auch indirekt psychomotorische Leistungen abgeprüft werden. Diesen schriftlichen Test dürfen die Schüler ebenfalls innerhalb ihrer Gruppen gemeinsam bearbeiten, jedoch muss jeder Schüler einen von ihm beantworteten Test abgeben. Bei der experimentellen Leistungsbeurteilung der Holografie wird jedem Schüler eine schriftliche Note und jeder Gruppe eine praktische Note vergeben. Diese werden im Verhältnis von 2:1 gewichtet und ergeben so die Gesamtnote dieser experimentellen Leistungsbeurteilung.

4.1.2 Inhalte der Unterrichtsreihe für den Grundkurs

Zeitliche Rahmenbedingungen

Die zeitlichen Rahmenbedingungen der Unterrichtsreihe im Grundkurs sind an den Zeitvorschlag des rheinland - pfälzischen Lehrplans angelehnt. Der Lehrplan für den Physikgrundkurs von Rheinland - pfalz schlägt dabei für den Wahlpflichtbaustein „Wellenoptik“ einen Zeitrahmen von zehn Stunden vor (Abb. 2.29). Im Grundkurs ist jedoch die volle Ausschöpfung der zehn Stunden mit der Holografie durch die Inhalte des Bausteins nicht gerechtfertigt. Es ist jedoch möglich, eine umfassende Unterrichtsreihe in sechs Stunden durchzuführen, was einen zeitlich kompakten Rahmen von zwei Schulwochen bedeutet und so einen weiteren Schwerpunkt innerhalb des Bausteins ermöglicht.

Unterrichtsinhalte im Grundkurs

Die Unterrichtsreihe beginnt mit dem Themenkomplex „Räumliches Sehen“. Um den Anteil des Gehirns am räumlichen Sehen zu erklären, bieten sich stereoskopische Bilder,

besonders die weit verbreiteten rot/cyan Bilder¹ an. Dazu werden Arbeitskopien (siehe Anhang) mit rot/cyan Bildern und die dazugehörigen Brillen an die Schüler ausgeteilt (Abb. 4.1). Anhand der Arbeitskopien wird dann erarbeitet, dass die rot/cyan Brille dafür sorgt, dass im rechten Auge nur der rote Anteil des Bildes und im linken entsprechend nur der cyane Anteil gesehen wird². Dieser Effekt kann recht schnell gezeigt werden, indem man auf die Arbeitskopien zusätzlich eine rote und eine cyane Fläche abdruckt und die Schüler bittet, diese mit abwechselnd zugehaltenem Auge durch die Brille zu betrachten. Nachdem die Funktionsweise der Brille mit den Schülern besprochen und ausprobiert wurde, kann nun erarbeitet werden, dass das räumliche Sehen zum Teil darauf zurückzuführen ist, dass das Gehirn aus zwei zweidimensionalen Bildern ein 3D³ Bild erzeugt.

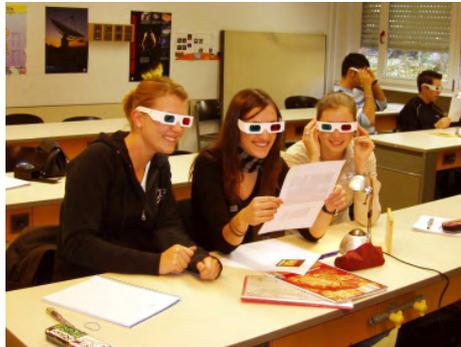


Abbildung 4.1: Schüler mit rot/cyan Brille

Ein weiteres vorbereitendes Thema ist das vom Objekt reflektierte Licht. Um dies zu vereinfachen, sollte vorausgesetzt werden, dass das entsprechende Objekt von einer monochromatischen und kohärenten Lichtquelle beleuchtet wird. Zunächst sollte dann die diffuse Reflektion (Kap. 2.1.3) aufgrund der rauhen Oberfläche von Objekten besprochen werden. Dabei wird erarbeitet, dass sich Licht bei der Reflektion an einem realen Objekt in alle Richtungen ausbreitet, sodass von mehreren Schülern aus verschiedenen Richtungen gleichzeitig ein bestimmter Teil der Oberfläche gesehen werden kann. Dabei sollte auch auf den scheinbaren Widerspruch zum Reflektionsgesetz eingegangen werden.

¹Besser bekannt ist die mittlerweile veraltete Farbcodierung rot/grün. Da das Prinzip jedoch bei beiden Farbcodierungen gleich ist, wurde für die Unterrichtsreihe die aktuelle Farbcodierung gewählt.

²Hierbei geht es ausdrücklich nicht darum mit Absorption von bestimmten Wellenlängenbereichen zu argumentieren, sondern um eine phänomenologische Klärung.

³Es sei hier angemerkt, dass der Begriff 3D den Schülern oft nicht klar ist, auch wenn sie ihn nutzen. Um später Missverständnisse zu vermeiden, sollte kurz darauf eingegangen werden, dass 3D eine Abkürzung für 3 Dimensionen ist. Ein 3D Bild gibt also die Breite, die Höhe und die räumliche Tiefe des abgebildeten Objekts wieder.

Die wellige Eigenschaft des Lichtes wird hinzugenommen, um mit Hilfe des Huygens'schen Prinzips zu erklären, dass das reflektierte Licht an einem realen Objekt wie eine kugelige „verbeulte“ Wellenfront aussieht. Die Form der Wellenfront ist dabei von der Amplitude und den Phasenunterschieden der einzelnen Wellen abhängig.

Vertiefend wird dann mit dem „Auto hinter der Glasscheibe“ (Kap. 2.1.3) die Ausbreitung der Wellenfront des Objektes deutlich gemacht. Jeder Schüler kann sich anhand dieses Modells überzeugen, dass jeder beliebige Oberflächenpunkt des Modellautos (z.B. das Hinterrad) hinter verschiedenen Punkten auf der Glasscheibe gesehen werden kann (Abb. 4.2).

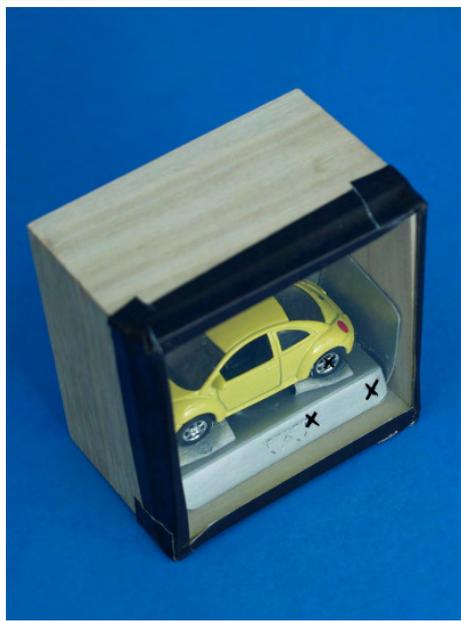


Abbildung 4.2: „Auto hinter der Glasscheibe“

Aufbauend auf diesen Grundlagen des räumlichen Sehens und der vom Objekt ausgehenden Wellenfront, kann nun die Holografie behandelt werden. Für eine erste Beobachtung werden pro Bankreihe eine Halogenlampe, ein Hologramm und eine Fotografie an die Schüler ausgegeben. Die Beobachtungen des Hologrammes im Vergleich zur Fotografie müssen sich dabei nicht darauf beschränken, dass das Hologramm ein 3 D Bild ist, das von einer zweidimensionalen Fläche hervorgerufen wird. Weitere Beobachtungen betreffen etwa die rote Farbe des Hologrammes, den eingeschränkten Winkelbereich, in dem das Hologramm sichtbar ist, und die Tatsache, dass Hologramme eine direkte Lichtquelle benötigen und nicht im diffusen Licht des Klassenraumes zu sehen sind.

Um den grundsätzlichen Unterschied zwischen stereoskopischen Bildern und Hologram-

men zu veranschaulichen, können sich die Schüler die rot/cyan Bilder und die Hologramme aus verschiedenen Richtungen anschauen (Abb. 4.3). Dabei fällt auf, dass im Gegensatz zu stereoskopischen Bildern in Hologrammen abgebildete Objekte von verschiedenen Seiten betrachtet werden können. Ein Hologramm muss damit die vollständige Wellenfront des Objektes wiedergeben. Die komplette Wellenfront muss also zunächst auch aufgezeichnet worden sein.



Abbildung 4.3: Schüler vergleichen stereoskopische Bilder und Hologramme

Charakteristisch für eine Wellenfront sind dabei die Phase und die Amplitude, die zusammen die Form der Wellenfront ausbilden. Die Phase kann, wie in Kap. 2.1.4 beschrieben, über eine Überlagerung mit einer Referenzwelle ermittelt und gespeichert werden. Die Intensitätsverteilung des resultierenden stehenden Interferenzmusters wird dann in einer lichtempfindlichen dreidimensionalen Emulsionsschicht gespeichert⁴.

Auf diesen theoretischen Überlegungen aufbauend, können die Schüler eigenständig einen entsprechenden Versuchsaufbau zur Aufnahme von Hologrammen planen. Dazu werden mittels einer Overheadfolie (die ebenfalls im Anhang zu finden ist) die nötigen Geräte den Schülern vorgegeben (Abb. 4.4). Ein Einstrahl Aufbau wird den Schülern zunächst noch nicht gezeigt, da er in der Leistungsbeurteilung als Transferaufgabe gestellt wird (siehe Kap. 4.1.4).

Die Emulsionsschicht, die Speicherung des Intensitätsmusters über Ausnutzung des Fotoeffekts, als auch die Entwicklungsprozesse können von den Schülern eigenständig mit Hilfe des Schülerskriptes erarbeitet werden.

Der in Kap. 2.1.5 vorgestellte Beweis (Gl. 2.4) besagt, dass die rekonstruierte Welle

⁴Dieser Sachverhalt ist besonders wichtig für das Verständnis der Holografie.



Abbildung 4.4: Schüler planen einen Versuchsaufbau zur Aufnahme von Hologrammen mit vorgegebenen Bauteilen

exakt der Objektwelle entspricht. Er ist für die Nutzung in der Schule nicht geeignet, da die Schüler die nötigen mathematischen Grundlagen noch nicht beherrschen. Daher wird den Schülern dieser Sachverhalt nur mitgeteilt: Man kann mathematisch beweisen, dass die Form der reflektierten Wellenfront identisch zu der der Objektwelle ist, wenn Licht auf das „Lochmuster“ der entwickelten Emulsion fällt. Dazu sollte in Erinnerung gerufen werden, dass man aufgrund der identischen Wellenfront bei einem Hologramm prinzipiell den gleichen optischen Eindruck wie beim Original erhält. Wenn man also das Hologramm aus einem anderen Winkel betrachtet, sieht man es - wie ein reales Objekt - auch wirklich von der Seite.

Damit sind die physikalischen Grundlagen der Holografie gelegt. Zur Vorbereitung auf die Leistungsbeurteilung werden die Schüler auch noch einmal auf die Sicherheitsbestimmungen hingewiesen. Außerdem wird die Herstellung von Hologrammen anhand des Skriptes besprochen. Auch die Anforderungen während des Tests und die Bewertungskriterien werden den Schülern bekannt gegeben und der Ablauf der Leistungsbeurteilung - Auslosung der Gruppen, Austeilen der Aufgaben, Bearbeiten der schriftlichen und praktischen Aufgaben, die auch Auf- und Abbau beinhalten - vorgestellt. Die Schüler werden aufgefordert eigene Objekte mitzubringen, von denen sie Hologramme aufnehmen möchten. Welche dafür geeignet sind, wird ihnen anhand einer Overheadfolie (siehe Anhang) erklärt. Zusätzlich wird zur Hausaufgabe in Form einer Rechenaufgabe die Berechnung der Belichtungszeit aus den bekannten Größen Leistung und Energie aufgegeben. Der Zusammenhang dieser Größen ist den Schülern bereits seit der Mittelstufe bekannt, sollte aber vor den Versuchen zur Holografie noch einmal ins Gedächtnis gerufen werden.

In der Doppelstunde, die der Bearbeitung der Grundlagen folgt, wird die erste und einzige Leistungsbeurteilung durchgeführt. Eine Behandlung der Inhalte der durchgeführten Leistungsbeurteilung ist in Kap. 4.1.4 und 4.1.5 zu finden.

Den Abschluss der Unterrichtsreihe bildet eine Stunde zur Anwendung der Holografie. Hierzu werden Materialien zu verschiedenen Themen zusammengestellt. Das Thema „Hologramme als Sicherheitsmerkmal auf Geldscheinen und Personalausweisen“ bietet einen interessanten Alltagsbezug. Die Materialien „Holografie in Medizin“, „Hologramme als Datenspeicher“, „Holografie in der Messtechnik“ und „Holografie in der Werbeindustrie“ bieten den Schülern die Möglichkeit, die große Bandbreite der Holografie kennen zu lernen.

4.1.3 Inhalte der Unterrichtsreihe für den Leistungskurs

Zeitliche Rahmenbedingungen

Auch im Leistungskurs wurde die zeitliche Rahmenbedingung an den Baustein „Wellenoptik II“ angelehnt, der mit zehn Stunden angesetzt ist. Da dieser Baustein deutlich mehr Gewicht auf die Wiederholung und Vertiefung anhand einer technischen Anwendung der Interferenz legt, ist es gerechtfertigt, die Zeit des Bausteins mit acht Stunden fast vollständig auszuschöpfen.

Unterrichtsinhalte

Die Unterrichtsinhalte entsprechen bis auf eine Ausnahme denen des Grundkurses. Im Leistungskurs wird zusätzlich auf die Rolle der Braggreflektion in der Holografie eingegangen. Da hier die Reflektion an ganzen Kristallen und nicht an einzelnen Ionen vorgenommen wird, ist es möglich, die Gesetzmäßigkeit an sichtbarem Licht zu demonstrieren. Das Hologramm verändert seine Farbe in den Farben des sichtbaren Spektrums von rot bis blau unter Veränderung des Winkels von groß zu klein (vergleiche Kap. 2.1.6).

Der um zwei Stunden größere Zeiteinsatz im Leistungskurs wird dabei zu einer zweiten Leistungsbeurteilung mit weiterführenden Versuchen zur Holografie - wie etwa der Herstellung von interferometrischen Hologrammen - genutzt (siehe Kap. 4.1.4).

4.1.4 Arbeitsblätter zur Leistungsbeurteilung

Arbeitsblätter für den Grundkurs bzw. erster Aufgabenteil des Leistungskurses

Für die Leistungsbeurteilung wurden im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit Arbeitsblätter entwickelt, die sowohl schriftliche als auch praktische Aufgaben beinhalten. Die Arbeitsblätter für den Grundkurs und diejenigen für den ersten Teil der Leistungsüberprüfung des Leistungskurses sind dabei bis auf die Zusatzaufgabe und kleine Änderungen, auf die in der folgenden Vorstellung hingewiesen werden, identisch. Im Anhang befinden sich die Arbeitsblätter für den Grundkurs und beide Teile für den Leistungskurs, sowie die dazugehörigen Musterlösungen. Außerdem sind dort die Aufgaben zum

zweiten Teil des Leistungskurses für eine andere Organisationsform zu finden (siehe Kap. 4.2.1).

Die ersten beiden Aufgaben der Arbeitsblätter (des Grundkurses bzw. des ersten Teiles des Leistungskurses) dienen nicht nur zur Leistungsbeurteilung, sondern führen die Schüler auch in die bevorstehenden Versuche ein. Dabei behandelt die erste Aufgabe den Versuchsaufbau und die grundlegenden physikalischen Inhalte der Holografie. So werden die Schüler zunächst aufgefordert, in eine Abbildung des bisher unbekanntes Einstrahl - Schulaufbaus diejenigen Strahlen einzuzeichnen und zu beschriften, die für die Aufnahme von Hologrammen benötigt werden. Dabei stellt nicht das Einzeichnen und Beschriften dieser Strahlen die Herausforderung an die Schüler dar, sondern der Transfer der gelernten Inhalte auf eine neue Situation. Den Schülern ist bisher bekannt, dass zur vollständigen Speicherung der Objektwelle eine Überlagerung mit einem zweiten Strahl, dem Referenzstrahl, nötig ist (siehe Kap. 4.1.2 und 4.1.3). Als Realisierungsmöglichkeiten wurden Ihnen aber bisher nur Zweistrahl - Aufbauten vorgestellt. Das Speicherungsprinzip ist bei dem noch unbekanntes Schulaufbau dasselbe, auch wenn dieser als Einstrahl - Aufbau scheinbar mit nur einem Strahl auskommt. Im nächsten Teil der Aufgabe werden die Schüler aufgefordert, in wenigen Sätzen wiederzugeben, wozu diese Strahlen nötig sind. Die dritte Teilaufgabe ist, wie auch die vorhergehende, eine reine Reproduktionsaufgabe, in der Zusammenhang des Photoeffekts mit dem Belichtungsprozess in kurzer Form wiedergegeben werden soll.

Thema der zweiten Aufgabe ist die Sicherheit beim Umgang mit Lasern. Die Schüler sollen vor der Nutzung des Aufbaus auch für einen sicheren Umgang mit dem Laser sensibilisiert werden. Die Schüler werden hier nach der Verhaltensregel im Umgang mit Lasern gefragt, die in der vorangegangenen Stunde besprochen wurde. Auf diese folgt eine weitere Reproduktionsfrage, in der die Schüler die für die im Aufbau benutzte (1mW starke) Laserdiode ausreichenden Schutzmaßnahmen benennen sollen. Die letzte Teilaufgabe ist eine Transferaufgabe und fragt nach dem Bereich, in dem der aufgeweitete Laserstrahl am gefährlichsten ist. Die Aufgabe wurde für den Leistungskurs leicht überarbeitet.

Die dritte Aufgabe ist eine rein praktische Aufgabe und bezieht sich auf die Inbetriebnahme des Aufbaus. Dazu werden einzelne Arbeitsschritte angegeben, die von den Schülern nacheinander ausgeführt werden sollen. Auch diese Aufgabe wurde für den Leistungskurs leicht überarbeitet.

In Aufgabe vier, die sowohl einen praktischen als auch einen schriftlichen Teil besitzt, sollen die Schüler mit Hilfe eines Photometers zunächst die Laserleistungsdichte an der Testplatte ausmessen. Anhand dieser Messung und der Herstellerangabe, dass die Holografieplatten möglichst eine Energie von $150 \mu\text{J}$ pro cm^2 absorbieren sollen, muss dann die optimale Belichtungszeit berechnet werden.

Die in Aufgabe vier berechnete Belichtungszeit wird dann in Aufgabe 5 benötigt. Hier soll mit Hilfe der im Schülerskript enthaltenen Kurzanleitung, die die Schüler während des Tests nutzen dürfen, ein Hologramm hergestellt werden. Eventuell auftretende Fehler des fertigen Hologramms können die Schüler mit Hilfe der auf dem Arbeitsblatt angegebenen Anleitung zum „Troubleshooting“ feststellen und eventuell nachträglich beheben oder bei der nächsten Hologrammaufnahme vermeiden.

Die letzte Aufgabe ist wiederum eine rein praktische Aufgabe, in der der Versuchsaufbau abgebaut, die Materialien gesäubert und weggeräumt werden sollen. Dabei wird bewusst eine bestimmte Uhrzeit für den Abbau in der Aufgabe angegeben, um den Schülern die begrenzte Zeit, die sie während des Versuches zur Verfügung haben, bewusst zu machen. Die Tatsache, dass Auf- und Abbau als Aufgaben aufgeführt sind, soll den Schülern deutlich machen, dass dies auch zur Leistungsbeurteilung gehört und damit ebenfalls bewertet wird.

Für den Grundkurs ist außerdem noch eine Zusatzaufgabe vorhanden, in der sich die Schüler Zusatzpunkte erarbeiten können. Hier werden die Schüler aufgefordert, ein durchgeschnittenes Hologramm zu betrachten, ihre Beobachtung zu beschreiben und eine Erklärung dieses Effektes anzugeben. In der Aufgabenstellung wird als Hilfe ein Verweis auf das „Auto hinter der Glasscheibe“ gegeben.

Zweiter Bewertungsteil des Leistungskurses

Zur zweiten Leistungsbeurteilung des Leistungskurses wurden ebenfalls Arbeitsblätter mit praktischen und schriftlichen Aufgaben entwickelt, für die jedoch ein tieferes Verständnis und höheres experimentelles Geschick im Vergleich zum ersten Teil benötigt wird.

Die erste Aufgabe fordert von den Schülern den Aufbau in Betrieb zu nehmen. Dazu werden die nötigen Schritte ebenfalls wieder angegeben. Die folgenden drei Aufgaben sind als Wahlaufgaben gestellt, von denen sich die Schüler zwei aussuchen können. Diese Aufgaben werden bei der Beurteilung gleich stark gewichtet und können so von den Schülern beliebig miteinander kombiniert werden. Außerdem sind sie nach dem gleichen Schema aufgebaut. Zunächst soll ein spezielles Hologramm hergestellt, seine Besonderheit beobachtet, beschrieben und zuletzt erklärt werden. Um zu verhindern, dass ein misslungenes Hologramm die Bearbeitung der restlichen Aufgabe verhindert, sollten bei der Durchführung Hologramme vorhanden sein, bei denen die verschiedenen Effekte leicht zu erkennen sind.

In Aufgabe 2 soll zunächst ein Hologramm hergestellt, dann mit einem Glasschneider durchgeschnitten und die Auffälligkeiten im Vergleich zu einer durchgeschnittenen Fotografie beschrieben und erklärt werden. Im Unterschied zur Zusatzaufgabe des Grund-

kurses wird beim Leistungskurs beim Erklärungsteil der Aufgabe nicht explizit auf das „Auto hinter der Glasscheibe“ verwiesen, da beim Leistungskurs allgemein ein tieferes Verständnis der physikalischen Gegebenheiten erwartet wird und auch abgeprüft werden soll.

In der dritten Aufgabe soll ein interferometrisches Hologramm aufgenommen werden. Da die Schüler diesen Begriff im Unterricht noch nicht behandelt haben, vermittelt ein kurzer Infotext den Schülern das für diese Aufgabe nötige Hintergrundwissen. Auch die nötigen fünf Schritte zur Aufnahme des interferometrischen Hologrammes werden in der Aufgabe angegeben.

In der letzten Wahlaufgabe sollen die Schüler zunächst vor der Aufnahme des Hologrammes die Holografieplatte anhauchen. Dies hat ein Aufquellen der Emulsionsschicht zur Folge, wie im Infotext der Aufgabe erläutert wird. Nachdem die Schüler das Hologramm fertig entwickelt haben, sollen sie dieses Hologramm mit den zuvor hergestellten Hologrammen vergleichen. Die leicht zu beobachtende Blauverschiebung der Hologramme müssen die Schüler dann mit Hilfe der Braggbedingung und dem Infotext erläutern.

Den Abschluss der Aufgaben bildet wieder der Arbeitsauftrag zum Abbau der Holografieaufbauten. Dieser ist wie auch im ersten Aufgabenteil mit einer Uhrzeit und Hinweisen zum Abbau versehen.

4.1.5 Bewertungsbogen zur Beurteilung der psychomotorischen und sozialen Leistungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Arbeitsblätter und damit die Grundlagen der schriftlichen Note vorgestellt wurden, wird an dieser Stelle auf die praktische Note näher eingegangen. Sie beruht dabei auf der Beobachtung der einzelnen Gruppen. In Anlehnung an [BV02a, Hep02, Hep06] wurden Bewertungskriterien für den praktischen Teil ausgewählt. Sie setzen sich dabei folgendermaßen zusammen:

- Durchführung:
 1. motorische Fähigkeiten:
Aufbau der Experimentieranordnung, Sachgerechte Nutzung der Experimentieranordnung, Abbau und Säuberung der Experimentieranordnung
 2. Herangehensweise:
Einhalten der Zeitvorgabe, Überblick über das Material (2 Photometer und 2 Stationen zu den geschnittenen Hologrammen müssen von 6 Gruppen geteilt werden), Sicherheit(Schutzkleidung, Schmuck)

- Teamarbeit:

1. innerhalb der Gruppen:
Aufgabenteilung, effizientes Arbeiten, gemeinsame Problemdiskussion, gemeinsame Problemlösung
2. innerhalb des Kurses:
Verantwortung den anderen gegenüber (Umgang mit dem Laser, den Chemikalien, der Türschleuse), Absprachen mit anderen Gruppen (Benutzung von Photometer und der Station zu den geschnittenen Hologrammen)

Um die Bewertung der Schüler zu erleichtern, wurde eine Bewertungstabelle erstellt, in der sich der Lehrer während der Schülerversuche Notizen eintragen kann. Dabei können in die Zeilen der Bewertungstabelle (siehe Anhang) die Namen der Gruppenmitglieder eingetragen werden. Auf der horizontalen Achse sind schmale Spalten für die einzelnen Kriterien und eine größere Spalte für weitere Notizen vorhanden. Die jeweiligen Kriterien werden, wie in [B⁺99] vorgeschlagen, mit (+),(0),(-) bewertet, und können direkt in die passenden Spalten und Zeilen eingetragen werden, wodurch eine schnelle Dokumentation der beobachteten Szenen erleichtert wird. Bei der späteren Reflektion und Beurteilung der Schüler ermöglicht die Tabelle dem Lehrer sich besser an einzelne Szenen zu erinnern. Sie dient als Gedächtnisstütze⁵.

⁵Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Umrechnung der Anzahl der erreichten (+) in eine Note oder ein gegenseitiges Aufwiegen von (+) und (-) nicht die Leistungen der Schüler wiedergibt.

4.2 Reflektion der durchgeführten Unterrichtsreihe

Bei der Durchführung der Unterrichtsreihe im Grund- und Leistungskurs Physik der Wiesbadener Gutenbergschule ließ sich feststellen, dass die Schüler starkes Interesse zeigten und konzentriert mitarbeiteten. Im Leistungskurs wurden einige weiterführende Fragen gestellt, die zeigten, dass sich die Schüler intensiv mit der Thematik befasst hatten. Zum Beispiel fragte ein Schüler, wie es sein könnte, dass nicht die ganze Emulsion belichtet würde, da die Lichtwellen doch durch die ganze Platte laufen und sich so dass Interferenzmuster doch verschieben müsste. Desweiteren war der Leistungskurs deutlich schneller als der Grundkurs, so dass trotz der zusätzlichen Behandlung der Braggbedingung, die Grundlagen der Holografie auch im Leistungskurs in drei Schulstunden behandelt werden konnten.

4.2.1 Reflektion der Leistungsbeurteilung

Grundkurs



Die Unterrichtsreihe und damit die Leistungsbeurteilung wurde zunächst im Grundkurs durchgeführt.

Die Schüler waren fast alle gut auf die Leistungsbeurteilung vorbereitet, fanden sich schnell in die gelosten zweier Gruppen zusammen und holten sich alle recht zügig ihre Versuchsmaterialien (Abb. 4.5). Generell war bei allen Schülern zu bemerken, dass sie zunächst den schriftlichen Bewertungsteil ablegen wollten und damit ganz traditionell den Schwerpunkt in diesem schriftlichen Teil sahen.

Während der Versuche musste ich feststellen, dass ich selbst die Schülern eher helfend unterstützte als dass ich in Ruhe die Schüler beobachtete und beurteilte. Dadurch hatte ich mir leider nur recht wenige Notizen zu manchen Gruppen gemacht. Im Anhang



Abbildung 4.6: Die Schüler bearbeiteten zunächst den schriftlichen Teil.

ist eine anonymisierte Abschrift des Bewertungsbogens zu finden, dabei werden die eigens vergebenen anonymen Namen (sowohl beim Grund- als auch beim Leistungskurs) beibehalten.

Wie auch in dem Bewertungsbogen notiert, hatten die Schüler 4 und 5 das vierte Kapitel des Schülerskriptes mit der Kurzanleitung zur Holografie nicht zur Vorbereitung gelesen. Sie holten dies aber im Versuch nach und arbeiteten während des Versuches sehr sorgfältig. Sie teilten die Arbeitsschritte sinnvoll untereinander auf und halfen sich gegenseitig bei der Benutzung der Türschleuse (einer hielt den Vorhang zu, während der andere hindurch ging). Bei Schüler 12 und 13 wurde die Holografieplatte im Becken nicht ganz schwarz. Die Ursache dafür liegt meistens in einer nicht vollständigen Ausleuchtung der Platte oder darin, dass die Platte mit der Emulsionsseite nach unten liegt und so das Entwicklungsbad nicht gleichmäßig auf die Schicht wirken kann. Im Gespräch stellte sich heraus, dass sie weder die Platten geschwenkt hatten noch wussten, in welcher Richtung die Platte im Becken lag. Positiv fiel mir Schüler 13 auf, der mit anderen Gruppen Absprachen bzgl. des Photometers traf und andere Gruppen auf das Tragen von Kittel und Handschuhen hinwies. Leider gab es auch einen Täuschungsversuch, Schüler 4 nutzte entgegen der Vereinbarung das ganze Schülerskript.

Desweiteren bemerkte ich, dass die Schüler viel zu lange Antworten schrieben, so dass weniger Zeit für die Versuche zur Verfügung stand⁶. Das Aufräumen der einzelnen Gruppen funktionierte recht gut, wobei natürlich einige schneller und einige langsamer waren. Dabei half eine Gruppe besonders tatkräftig beim Aufräumen mit, was positiv im Bewertungsbogen vermerkt wurde.

⁶Bei den Arbeitsblättern des Leistungskurses wurden daher die Anzahl der Antwortsätze vorgegeben.

Leistungskurs: erster Teil der Beurteilung

Wie auch im Grundkurs akzeptierten die Schüler des Leistungskurses das Losverfahren und fanden sich mehr oder weniger schnell in Gruppen zusammen. Lediglich Schüler 7 äußerte seinen Unmut, mit Schüler 6 zusammen arbeiten zu müssen. Ich konnte jedoch später beobachten, dass sie sich doch ganz gut „zusammen gerauft“ hatten und gut gemeinsam arbeiteten.

Nach den Erfahrungen im Grundkurs bemühte ich mich beim Leistungskurs von Anfang an, bewusst die einzelnen Arbeitsschritte der Gruppen zu verfolgen. Dies gelang recht gut, so dass ich viele Notizen machen konnte. Auch dieser Bewertungsbogen befindet sich in abgeschriebener und anonymisierter Form im Anhang.

Es fiel deutlich auf, dass der Leistungskurs sich sehr unterschiedlich stark auf den Test vorbereitet hatte. Einige hatten das Skript zur Vorbereitung nicht gelesen, und die Schüler einer Gruppe waren, im Gegensatz zu den Schülern des Grundkurses, noch nicht einmal dazu bereit, das vierte Kapitel des Skriptes trotz mehrmaliger Aufforderung vor Ort zu lesen. Dadurch ergaben sich bei dieser Gruppe Schwierigkeiten, die sich auf unsachgemäße Nutzung des Versuchsaufbaus zurückführen ließen. Im krassen Gegensatz zu dieser Gruppe arbeitete die „dreier Gruppe“ bestehend aus Schüler 1, Schüler 2 und Schüler 3 nahezu perfekt. Diese Gruppe hatte als erste Gruppe alle benötigten Materialien an ihrem Arbeitsplatz und diese vollständig aufgebaut. Bei der Bearbeitung des schriftlichen Tests wurde zur Findung der Lösung sachgerecht argumentiert und diskutiert. Bei der praktischen Durchführung arbeitete die ganze Gruppe sehr konzentriert und nutzte die Experimentieranordnung sachgerecht. Lediglich die Holografieplatten wurden nicht durchgängig in den Bädern geschwenkt. Diese effiziente Arbeitsweise war zudem durch eine sehr gute Zeiteinteilung gekennzeichnet. Sie gehörte zu den zwei Gruppen, die alle ihnen zur Verfügung stehenden Hologramme belichtete und war die einzige Gruppe, die zur vorgegebenen Zeit mit dem Abbau fertig war. Dabei konnte man deutlich bei der Durchführung beobachten, dass Schüler 1 von selbst die Rolle des Gruppenleiters übernahm und so die verschiedenen Arbeiten koordinierte und sehr positiv die Effizienz und Zeiteinteilung der Gruppe beeinflusste.

Wie auch die zuerst beschriebene Gruppe benötigten Schüler 6 und 7 sehr lange, um sich das ausliegende Material zu beschaffen und achteten dabei nicht auf Vollständigkeit. Desweiteren fiel bei Ihnen sehr deutlich auf, dass sie zunächst den Test inklusive der Zusatzaufgabe schrieben, bevor sie wieder an den Aufbau gingen. Generell dauerte alles, was sie taten, lang. Bei der Nutzung des Aufbaus fiel mir aber positiv auf, dass sie ihr Objekt gut justiert und ziemlich optimal ausgeleuchtet hatten. Die Gruppe von Schüler 4 und 5 nutzten den Aufbau sachgerecht und konnten in einem kurzen Gespräch, wie auch die dreier Gruppe, zeigen, dass sie wussten was, warum und wann zu tun ist. Beim Abbau arbeiteten sie sehr sorgfältig und bestückten die Wannens auch

wieder ordnungsgemäß.

Leistungskurs: zweiter Teil der Beurteilung

Da die Wiesbadener Schule die durchgeführte Unterrichtsreihe auf einer Veranstaltung vorstellen wollte, musste leider die zweite Doppelstunde auf eine Zeitstunde verkürzt werden. Aus diesem Grund wurde der schriftliche Test nicht, wie ursprünglich vorgesehen, während der Versuche bearbeitet, sondern erst in der darauffolgenden Stunde. So mussten die Schüler nur die zu den Aufgaben zugehörigen Hologramme herzustellen, wobei nur die Bearbeitung von zwei der drei praktischen Aufgaben gefordert war.

Bei dieser zweiten Nutzung des Aufbaus war deutlich ein „Gewöhnungseffekt“ der Schüler im Umgang mit dem Aufbau zu sehen, so dass innerhalb von 15 Minuten alle Schüler die nötigen Materialien geholt, die Lampen montiert, den Aufbau aufgebaut, die Becken gefüllt, die Objekte und die Laserdioden justiert und die Strahlengänge ausgerichtet hatten. Dabei waren keine Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen zu bemerken. Auch das Verhalten der Gruppen bezüglich Schutzkleidung und anderen Sicherheitsmaßnahmen besserte sich bei allen Gruppen deutlich. Aufgrund der knappen Zeit entschieden sich leider alle Gruppen gegen die etwas zeitaufwändigere Herstellung der interferometrischen Hologramme.

Im Beurteilungsbogen dieses zweiten Versuchsteils sind deutlich weniger Notizen vorhanden als in dem des ersten Teils. Aufgrund der knappen Zeit konnte ich während der Durchführung nur selten durch die Reihen gehen, um bei Diskussionen der Schüler zuzuhören oder einzelne Arbeitsprozesse zu beobachten. Der Abbau wurde zufriedenstellend und pünktlich von allen Schülern durchgeführt.

Die Beurteilung der restlichen Aufgabenhälften (Beobachtung und Erklärung der Effekte) wurde dann in der darauf folgenden Stunde durchgeführt. Die Schüler arbeiteten dabei in den neu gelosten Gruppen des zweiten Beurteilungsteils zusammen. Zur Beobachtung der Effekte wurde an drei verschiedenen Tischen zu jeder Aufgabe eine Stationen aufgebaut (Abb. 4.7). So wurden an zwei Stationen Halogenlampen aufgestellt, unter denen entweder ein geschnittenes Hologramm oder ein normales rotes und ein vor der Belichtung angehauchtes und dadurch blaues Hologramm verglichen wurde. Die dritte Station bestand aus dem Schüleraufbau, mit dessen Diode das interferometrische Hologramm angeleuchtet und damit die Streifen gezeigt werden konnte. Die Gruppen konnten abwechselnd an die Stationen gehen, die Effekte beobachten und dann an ihren Plätzen sowohl die Beobachtung als auch die Erklärung beschreiben. Dabei fiel auf, dass alle Gruppen sowohl an den Stationen als auch am Arbeitsplatz ihre gemachten Beobachtungen und das Für und Wider möglicher Ursachen lebhaft diskutierten.



Abbildung 4.7: Zur Beobachtung der Effekte wurde an drei verschiedenen Tischen zur jeder Aufgabe eine Stationen aufgebaut. Links: Station „Geschnittenes Hologramm“; Mitte: Station „Angehauchtes Hologramm“; Rechts: Station „Interferometrisches Hologramm“

4.2.2 Reflektion der Ergebnisse der Leistungsbeurteilung

Da im Grundkurs die Beobachtung der Schüler nicht in ausreichendem Maße gelang (siehe Kap. 4.2.1), wurde auf eine Vergabe von Noten im praktischen Teil verzichtet und nur die Note im schriftlichen Teil bestimmt. Beim Leistungskurs konnten beide Noten getrennt vergeben werden. Im Anhang befinden sich in anonymisierter Form die Notenverteilung des praktischen und des schriftlichen Teils der Leistungsbeurteilung für die Teilnehmer des Leistungskurses

Die Durchführung der Leistungsbeurteilung im Leistungskurs zeigte, dass es möglich ist, auch praktische und soziale Leistung sinnvoll zu bewerten. Im Anhang sind die einzelnen Leistungen der Schüler dargestellt. In der ersten Tabelle sind dabei die von den Schülern erreichten praktischen Leistungen aufgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Schüler sich von der ersten zur zweiten Leistungsbeurteilung verbessert haben. Im Einzelfall des Schülers 9 sogar um drei Notenstufen. Die Verschlechterung des Schülers 2 ist auf eine körperliche Auseinandersetzung mit Schüler 6 zurückzuführen, da dieses Fehlverhalten bei beiden Schülern mit einer Herabsetzung der erreichten Gruppennote um eine volle Notenstufe geahndet wurde. Die praktische Gesamtnote ergibt sich durch Verrechnung der beiden Teilnoten.

In der zweiten Tabelle wird die praktische Gesamtnote der Schüler und der in beiden Tests erbrachten schriftlichen Leistungen, die in prozentualer Form angegeben sind, dargestellt. Dabei werden bei den schriftlichen Leistungen zwei Werte angegeben. Der erste Prozentwert sind die erreichten Punkte im Verhältnis zu der erreichbaren Gesamtpunktzahl, wobei die Zusatzaufgabe nicht berücksichtigt wurde. Die zweiten in Klammern stehenden Werte beinhalten die Zusatzaufgabe, wobei als 100% die maximal erreichbaren Punkte und nicht, wie vorgesehen, die erreichbaren Punkte ohne die Zusatzaufgabe angesetzt wurde. Würde die Zusatzaufgabe, wie ursprünglich angedacht, einfach zu den erreichten Punkten bei gleich bleibender Gesamtpunktzahl

addiert, würde sich eine extreme Verschiebung der Noten nach oben ergeben. Daher werden in dieser Tabelle die erreichten Punkte einmal mit und einmal ohne Zusatzaufgabe mit entsprechenden Gesamtpunktzahlen aufgeführt.

In dieser Tabelle ist ein übersichtlicher Vergleich zwischen schriftlichen und praktischen Leistungen der Schüler möglich. Der in Kap. 2.3.1 beschriebene ausgleichende Charakter der experimentellen Leistungsbeurteilung ist in der Tat in dieser Tabelle besonders bei Schüler 5 zu sehen. Obwohl er im schriftlichen Teil als kursschlechtester nur 53% (61%) erhalten konnte, teilt er sich mit Schüler 2 die drittbeste Note. Auch bei Schüler 4 ist eine leicht ausgleichende Tendenz zu erkennen. Er war mir schon in der Unterrichtsreihe aufgefallen, obwohl er im Unterricht zuhörte und nicht störte, beteiligte er sich kein einziges mal aktiv am Unterricht. Er zeigt gegenüber anderen Schülern, auch gegenüber deutlich leistungsstärkeren Schülern des Kurses, bessere oder gleich gute praktische Leistungen. Aber auch die gegenteilige Tendenz ist zu erkennen, so dass der im schriftlichen Teil kursbeste Schüler 7 im praktischen nur durchschnittliche Leistungen zeigte. Wie bei Schüler 1 zu sehen, ist eine sehr gute schriftliche Leistung aber nicht notwendigerweise mit mittleren bis schlechten praktischen Noten verbunden.

Dieser ausgleichende Charakter wurde auch von Frau Fischer, der Fachlehrerin des Grundkurses, bei zwei Schülern ihres Kurses beobachtet. Diese hatten in den zuvor geschriebenen Kursarbeiten sehr schlechte Ergebnisse erzielt. Doch anstelle im darauf folgenden Unterricht aufzugeben, nutzten sie das Thema „Holografie“ dazu, sich aktiv am Unterricht zu beteiligen und fielen beim Experimentieren durch hohes Engagement positiv auf [Fis06].

An dieser Tabelle ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass der Prozentpunktespiegel der schriftlichen Leistungsbeurteilung des Leistungskurses nach oben verschoben ist. Das kann verschiedene Gründe haben. Zum einen könnte der Anspruch der Aufgaben generell zu niedrig sein. Dagegen spricht jedoch, dass kein Schüler in der Gesamtbewertung die 90% erreichen konnte. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für dieses Ergebnis wäre, dass eine Aufgabe viel zu schwer, alle anderen zu leicht gewesen wären. Aber auch dies lässt sich aufgrund der Punkteverteilung, die sich im Anhang befindet (dritte und vierte Tabelle) nicht bestätigen. Es kann dort keine Aufgabe ausgemacht werden, die von allen oder einem Großteil der Schüler nicht beantwortet werden konnte. Als Gründe für den verschobenen Prozentpunktespiegel kommt daher eher eine hohe Motivation der Schüler, und ein gut funktionierender Wissensaustausch in den Schülergruppen in Frage. Außerdem konnten fast alle Schüler die Reproduktionsaufgaben (Aufgabe 1 und 2 des ersten Teils) sehr gut beantworten, woraus sich schließen lässt, dass sie die physikalischen Hintergründe der Holografie verstanden haben und diese auch schriftlich formulieren können.

Das Konzept der Unterrichtsreihe Holografie und der dazugehörigen Leistungsbeurtei-

lung erwies sich in der Durchführung als in sich stimmig. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Holografie auch in der Praxis sowohl für eine Unterrichtsreihe als auch für eine Leistungsbeurteilung am Experiment gut eignet.

5 Rück- und Ausblick

In dieser Staatsexamensarbeit wurde eine Unterrichtsreihe zur Holografie vorgestellt, die in diesem Rahmen konzipiert und in zwei Kursen der Sekundarstufe II durchgeführt wurde. Dabei wurden zunächst sowohl physikalische Grundlagen als auch die geschichtlichen Hintergründe und heutigen Anwendungsgebiete der Holografie erläutert. Die Unterrichtsreihe schließt eine speziell entwickelte Leistungsbeurteilung am Experiment ein, ein Ansatz der in Deutschland noch nicht weit verbreitet ist. Die didaktischen Grundlagen dieses Ansatzes werden in dieser Arbeit beschrieben und die besondere Eignung der Holografie als Experiment zur Leistungsbeurteilung werden begründet. Für die experimentelle Leistungsbeurteilung wurden im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit Schulaufbauten entwickelt, die kostengünstig, robust und leicht erhältlich sind. In dem Kapitel „Holografie in der Schule“ wird das Konzept der Unterrichtsreihe und der Leistungsbeurteilung vorgestellt, und zusätzlich auch die Grundlagen erläutert, auf denen eine Beurteilung der praktischen und schriftlichen Leistungen basiert. Die Ergebnisse der Schüler aus den beiden Kursen, in denen die Unterrichtsreihe durchgeführt wurde, zeigen, dass es möglich ist praktische und soziale Leistungen beim Experimentieren sinnvoll zu bewerten. Auch ein ausgleichender Charakter dieser Noten für praktische Fähigkeiten im Vergleich zu verbalen bzw. schriftlichen Leistungen konnte bei einzelnen Schülern beobachtet werden.

In den abschließenden Kritikrunden, die in beiden Kursen stattfanden, gab es Aussagen wie „Ich hätte nie gedacht, dass ich in der Schule selber Hologramme herstellen kann!“. Das Thema Holografie wurde von den Schülern als sehr interessant eingestuft. Weiter wurde die Verbindung von theoretischen Lernen und praktischer Arbeit und die ausgeteilten Materialien (Schülerskript, Arbeitsblätter) sehr positiv bewertet. Von den Schülern wurde bemängelt, dass leider nur recht wenige Hologramme etwas geworden sind. Dies lag vermutlich daran, dass die Schüler die Hologramme nicht ausreichend ausleuchteten, und die Bedeutung der zweiminütigen Wartezeit vor der Hologrammaufnahme unterschätzten. Es kann ausgeschlossen werden, dass die Schulaufbauten Ursache dieser Probleme waren, da die beim universitären Holografiepraktikum teilnehmenden Oberstufenschüler mit denselben Schulaufbauten zahlreiche und schöne Ergebnisse erzielen konnten. Die praktische Lernerfolgskontrolle war für die Schüler ungewohnt, da sie zum ersten Mal erfolgte. Weiter gaben sie an, dass sie, trotz vorheriger Erklärung, nicht genau wussten, was genau bei der praktischen und sozialen Kompetenz bewertet wurde. Dies ist eine Kritik, die laut [Hep06] bei der ersten Leistungsbeurteilung am Experiment sehr häufig auftritt. Erfahrungsgemäß wird dieser Kritikpunkt immer schwächer wenn diese ungewohnte Bewertungsform häufiger eingesetzt wird, da die

Schüler wie auch bei schriftlichen Tests mit der Zeit eine gewisse Routine entwickeln und die Erwartungshaltung des Lehrers erkennen.

Das Wiesbadener Gymnasium „Gutenbergschule“ plant seit der Durchführung der beiden Unterrichtsreihen in naher Zukunft die Gründung einer Holografie AG, wozu zunächst zwei leerstehender Kellerräume in ein Holografielabor umgebaut werden sollen. Das Labor soll dann mit den in dieser Staatsexamensarbeit entwickelten Aufbauten ausgestattet werden. Diese Räumlichkeiten könnten dann auch von Oberstufenkursen genutzt werden, die die Holografie im Rahmen einer Unterrichtsreihe durchführen.

In der Arbeitsgruppe LARISSA des Instituts für Physik der Johannes Gutenberg - Universität wird das deutlich weiterentwickelte Holografieprojekt für Schülergruppen angeboten, zusätzlich ist ein Projektaustausch mit der Universität Göteborg in Schweden geplant. Die Resultate dieser Staatsexamensarbeit werden bei der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2007 in Regensburg, Fachverband Didaktik, im Rahmen einer Posterpräsentation, bei der zusätzlich auch der entwickelte Schulaufbau ausgestellt wird, vorgestellt.

Als weiterführende Schritte über den engen Rahmen des Schulfaches Physik hinaus kann die Holografie im Rahmen einer fächerverbindenden Unterrichtseinheit zum Thema „Die dritte Dimension“ als physikalischer Beitrag eingebunden werden. Seitens der Kunst könnte dort z.B. die Hologramme, die in gemeinschaftlicher Arbeit von Salvatore Dali und Dennis Gabor, entstanden als auch das räumliche Zeichnen behandelt werden. In der Biologie kann etwa das räumliche Wahrnehmungsvermögen von Mensch und Tier Thema der Einheit sein. Auch die Einbeziehung der Mathematik ist über den Einsatz Dynamischer Geometrie Software wie etwa Euklid möglich, wobei perspektivische Zeichnungen oder sogar dynamisch animierte stereoskopische Rot/Cyan Bilder durch die Schüler erstellt werden können.

Durch Schülerprojekttage und der Mintec-Messe in Bad Schwalbach 2007 (auf der die Gutenbergschule und die Universität Mainz die Unterrichtsreihe vorstellten) sind einige Lehrer auf die Unterrichtsreihe aufmerksam geworden und haben den Wunsch geäußert, die Unterrichtsmaterialien zu erhalten. Dies wird durch die Einstellung der gesamten Staatsexamensarbeit ins Internet ermöglicht und kann so auch eine Verbreitung der Unterrichtsreihe und der dazu entwickelten Leistungsbeurteilung am Experiment bewirken, auf deren Resonanz weitere fachdidaktische Projekte und Konzepte entstehen können.

Literaturverzeichnis

- [3D 04] 3D - LAB HAMBURG. *Budget HoloKit*. <http://www.3d-lab.de/holokits.htm>, 2004.
- [B⁺98] H. BAYRHUBER ET AL. *Linder Biologie*. Schroedel Verlag, Hannover, 21. Auflage, 1998.
- [B⁺99] W. BLEICHROTH ET AL. *Fachdidaktik Physik*. Aulis Verlag Deubner, Köln, 1999.
- [BH98] G. BOVET UND V. HUWENDIEK. *Leitfaden Schulpraxis - Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf*. Cornelsen, Berlin, 1998.
- [Bly05] J. BLYTH. *Holograms*. <http://cabd0.tripod.com/holograms/index.html>, 2005.
- [Bra02] R. BRANDT. *Andere Länder - andere Tests, Praktische Physiktests im General Certificate of Education*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 71/72, 2002.
- [BS03] K. BUSE UND E. SOERGEL. *Holographie in Wissenschaft und Technik*. Physik Journal, Band 3, 2003.
- [Bun04] BUNDESDRUCKEREI. *Sicherheitsmerkmale des Personalausweises*. <http://www.bundesdruckerei.de/de/iddok/>, 2004.
- [BV02a] O. BERGE UND M. VOLKMER. *Lernerfolgskontrolle mit Experimenten - Didaktische Aspekte*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 71/72, 2002.
- [BV02b] O. BERGE UND M. VOLKMER. *Schülerexperimente als Testsituation - Hinweise zur Konzeption und Bewertung*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 71/72, 2002.
- [C⁺91] R. CLAUS ET AL. *Natura*. Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1. Auflage, 1991.
- [Dem04] W. DEMTRÖDER. *Experimentalphysik 2*. Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [Den04] C. DENZ. *Riesenspeicher auf kleinstem Raum*. www.uni-muenster.de/Rektorat/upm2/2004/upm05130.htm, 2004.

- [Deu05] DEUTSCHE BUNDESBANK. *Unser Geld*.
http://www.bundesbank.de/bildung/bildung_sekundarstufe1.php, 2005.
Pädagogische Handreichung.
- [Eng04] K. ENGELN. *Studien zum Physiklernen*. Logos Verlag Berlin, Kiel, 2004.
- [Fis06] I. FISCHER. Persönliche Mitteilung, 2006.
- [FL⁺] D. FRIES, J. LEISEN ET AL. *Lehrplan Physik*. <http://alt.bildung-rp.de/lehrplaene/alleplaene/physik-gym-oberstufe.pdf>.
- [HB03a] M. HALLE UND S. A. BENTON. *Anleitung zur Sourcedemo, Vorlesungsmaterial der Univerität Harvard*. <http://splweb.bwh.harvard.edu:8000/courses/mas450/holodemos/sourcedemo/index.html>, 2003.
- [HB03b] M. HALLE UND S. A. BENTON. *Computer Demos, Vorlesungsmaterial der Univerität Harvard*.
<http://splweb.bwh.harvard.edu:8000/courses/mas450/holodemos/>, 2003.
- [Hei95] P. HEISS. *Die neue Holographie-Fibel*. Wittig Fachbuch, Hückelhoven, 1995.
- [Hep02] R. HEPP. *Experimente im Unterricht bewerten - Ein langfristiges Konzept*.
Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 71/72, 2002.
- [Hep06] R. HEPP. Persönliche Mitteilung, 2006.
- [Her06] P. HERING. *Digitale holografische Gesichtsvermessung*.
<http://www.caesar.de/holographyandlaser.0.html>, 2006.
- [Hes] HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM. *Lehrplan Physik*.
<http://lernarchiv.bildung.hessen.de/archiv/lehrplaene/gymnasium/physik/>.
- [Hol85] W. HOLLEMANN. *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Walter de Gruyter, Berlin, 1985.
- [Hop04] M. HOPF. *Schülerexperimente - Stand der Forschung und Bedeutung für die Praxis*.
Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule, Band 6/53, 2004.
- [Kul03] KULTUSMINISTERKONFERENZ. *Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht*.
<http://nibis.ni.schule.de/nli1/bbs/archiv/rahmenrichtlinien/kmksiu.pdf>, 2003.
- [Lan02] N. LANG. *Sociolexikon*. <http://www.socioweb.de/lexikon/>, 2002. Gemeinschaftsprojekt in den Fachbereichen Sozialwesen und Wirtschaftspsychologie der Fachhochschule Nordostniedersachsen.

-
- [MH05] H. W. M. HOPF, E. HERAN-DÖRR. *Aktivierende Unterrichtsmethoden - ein Überblick*. Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule, Band 8/54, 2005.
- [ML05] C. v. R. M. LAUKENMANN, J. KÜBLBECK. *Ein Unterrichtskonzept zur Verknüpfung emotionaler und kognitiver Aspekte des Lernens*. Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule, Band 8/54, 2005.
- [New06] NEWPORT CORPORATION. *Spatial Filters*. <http://www.newport.com>, 2006.
- [Ols05] O. OLSCHESKI. *Der Online-Shop für die 3. Dimension*. <http://www.3d-foto-shop.de>, 2005.
- [Ost07] D. OSTENDORF. Persönliche Mitteilung, 2007. Experimente zur Leistungsbeurteilung im Chemieunterricht bei Herrn Klinger, Gymnasium Nieder-Olm.
- [Pae06] J. PAEGER. *Öko System Erde - Der Mensch*. <http://www.oekosystemerde.de/html/mensch.html>, 2006.
- [Pop06] C. POPPE. *Nobelpreis*. <http://www.nobelpreis.org/physik/gabor.htm>, Jahr nicht bekannt, Tag der Nutzung: 22.11.2006.
- [Pus02] O. PUSCHER. „*Vom Kerzenlicht zum Laser - Konzeption und Durchführung eines Schülerlabors*“. Wissenschaftliche Prüfungsarbeit im Fach Physik im Rahmen des 1. Staatsexamens an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2002.
- [Sax04] G. SAXBY. *Practical Holography*. Institute of Physics Publishing, London, 2004.
- [Sch77] H. SCHIER. *Die Kontrolle der psychomotorischen Dimension von Lernzielen im Physikunterricht*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie, Band 25, 1977.
- [Uli06] M. ULIBARRENA. Persönliche Mitteilung, 2006. R und D Manager, Colour-holographics Ltd.
- [VC05] M. VOLLMER UND C. CHIAVERINA. *Learning physics from the experiments*. <http://www.girep2005.fmf.uni-lj.si/>, 2005. DW Report of Groupe International sur l'Enseignement de la Physique (GIREP).
- [Vol02] M. VOLKMER. *Einstieg in eine Lernerfolgskontrolle mit Experimenten*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 71/72, 2002.

A Anhang

A.1 Allgemeines

- Konstenaufstellung
- Holografmaterialien Checkliste
- Anleitung zum Vorquellen der Holografieplatten BB640

Kostenaufstellung

Holografieaufbau

Produkt	Bestellnummer	Firma	Preis in €
1 Lasermodul 1mW 650nm	LDM650/1LJ	Roithner Lasertechnik	12,00
2 AA Batterien 1,5V		Conrad	1,00
1 Batteriehalterung für 2 AA	615625 - 62	Conrad	1,08
1 Batterieclip 9V	624691 - 62	Conrad	0,36
1 Abflussrohr Höhe 50-60 cm		Baumarkt	1,75
1 Abflussrohrstopfen		Baumarkt	0,95
1 Mousepad		Media Markt	1,00
1 scharzer Karton		Schreibwarenhandel	0,50
1 Partybirne grün 25W		Karstadt	2,19
1 Lampe	Tertial	Ikea	7,17
3 Laborschalen	C029.1	Carl Roth GmbH	14,70
Gesamtpreis			42,70

Tabelle A.1: Kostenaufstellung für einen Holografieaufbau

Zubehör

Die angegebenen Mengen reichen für sechs Schülergruppen aus.

Produkt	Bestellnummer	Firma	Preis in €
schwarze Kinderknete		Schreibwarenhandel	4,20
1 Glasschneider		Baumarkt	1,95
50 kg Spielsand		Baumarkt	3,90
Reagenzglasklammern	0645.1	Carl Roth GmbH	6,10
1 Digital Photometer		Edmund Optics	236,25
Gesamtpreis			252,40

Tabelle A.2: Kostenaufstellung Zubehör

Türschleuse

Produkt	Bestellnummer	Firma	Preis in €
Duschvorhang-Stange		Baumarkt	16,31
Teichfolie		Baumarkt	3,20
Gesamtpreis			19,51

Tabelle A.3: Kostenaufstellung Türschleuse

Verbrauchsmaterial

Produkt	Bestellnummer	Firma	Preis in €
1l Triethanolamin 99%	6300.1 (C.A.S.:102-71-6)	Carl Roth	17,30
0,5l Entwicklungsbad	(einmal verwendbar)	Junker Holografie	16,00
Stoppbad 3% Essigsäure	(in der Schule ansetzen)		0,00
4l Bleichbad	(mehrfach verwendbar)	Junker Holografie	64,00
40 Holografieplatten	BB640/1	Colourholographic	197,62
6 Rollen Küchentücher		Supermarkt	1,95
Latexhandschuhe S/M/L	C268.1 / C269.1 /C270.1	Carl Roth GmbH	10,80
Gesamtkosten			307,67

Tabelle A.4: Kostenaufstellung Verbrauchsmaterial

Hinweise:

- Alternativ zu den teuren, jedoch sehr hochwertigen BB640 Platten können die kostengünstigeren PFG01 Platten oder Filme genutzt werden (www.slavich.com).
- Es ist auch möglich, zwei Gruppen an einer „Entwicklungsstation“ zusammen arbeiten zu lassen, so können die Kosten weiter gesenkt werden.
- 1 l Triethanolamin reicht für ca. 660 Vorquellbäder, ist also eine einmalige Anschaffung für eine Schule.
- Das Lasermodul kann auch in 635 nm bestellt werden. Die Wellenlänge des Lasermoduls ist abhängig von den Holografieplatten. Die BB640 sind im Bereich von ca. 630 bis 650 nm sensitiv und bei 640 nm am sensitivsten.

Firmenadressen:

Name	Homepage
Roithner Lasertechnik GmbH	www.roithner-laser.com
Carl Roth GmbH	www.carl-roth.de
Junker Holografie	www.holografie.com
Colourholographic	www.colourholographic.com
Edmund Optics	www.edmundoptics.de
3D Foto Shop (Rot/Cyan Brillen)	www.3d-foto-shop.de

Tabelle A.5: Firmenadressen

Holografieaterialien Checkliste

Diese Checkliste dient zur Überprüfung der Vollständigkeit des Zubehörs und soll so den Überblick bei der Vorbereitung erleichtern. Sie ist dabei für 6 Gruppen (12-18 Schüler) ausgelegt.

Holografieaufbauten:

- 6 Lasermodule
- 6 Rohre mit Stopfen
- 6 Batteriehalterungen mit Batterien
- Sand
- 6 Reagenzglasklammern
- 8 Grünlichtlampen
(6 für die Aufbauten, 1 fürs Wasserbecken und 1 für die Föhnstation)
- 6 Mousepads mit Alufolie umwickelt
- Knete
- 6 Pappkartons
- 6 Testplatten

Entwicklungszubehör:

- Holografieplatten
- 6 Entwicklungsbäder
- 6 Stoppbäder
- 6 Bleichbäder
- 18 Laborschalen
- Entsorgungskanister
- Schilder für die Bäder
- Handschuhe

- Kittel
- 6 Trichter
- 6 Rollen Küchentücher

Sonstiges:

- Aufgabenblätter
- Bewertungsbogen
- 1 Türschleuse incl. Stange und Klebeband
- 2 Halogenlampen
- 1 bis 2 Photometer
- 4 Objekte (falls die von den Schülern mitgebrachten Objekte sich nicht eignen)
- Spielkarten zur Auslosung der Gruppen
- 1 geschnittenes Hologramm (nur beim Grundkurs)
- 2 Glasschneider (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)
- 6 kleine Messing- oder Stativstangen (nicht schwarz!) (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)
- 6 Muffen (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)
- 1 grünes oder blaues Hologramm (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)
- 1 geschnittenes Hologramm (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)
- 1 interferometrisches Hologramm (nur beim 2. Teil des Leistungskurses)

Anleitung zum Vorquellen der Holografieplatten BB640

Die Holografieplatten verlieren mit der Zeit ihre Lichtempfindlichkeit. Diese kann jedoch für eine gewisse Zeit (ca. 48 Stunden) wieder hergestellt werden. Dazu werden die Holografieplatten für zwei Minuten im gut durchmischten Vorquellbad geschwenkt. Dies besteht aus Triethanolamin (TEA C.A.S.:102-71-6), das mit dest. Wasser zu einer 0,5 % Triethanolaminlösung verdünnt wird. Die Holografieplatten müssen natürlich im Grünlicht vorgequollen werden und die Platten sollten, wie bei jeder Behandlung, mit der Emulsionsseite nach oben im Becken liegen.

Danach werden die Hologramme wie im Schülerskript beschrieben mit Küchentüchern abgetrocknet. Zusätzlich sollten sie entweder noch eine Stunde in der Dunkelkammer austrocknen oder mit Hilfe eines Kaltluftföhns weiter getrocknet werden. (Wenn die Platten nicht richtig trocknen schrumpft die Emulsionsschicht nicht auf ihre Normaldicke zurück, die Hologramme erscheinen blauverschoben. Siehe Aufgabe 4 des zweiten Leistungsbeurteilungsteils.)

Nicht verwendete bereits vorgequollene Holografieplatten, können später wieder vorgequollen werden.

Beeinflussung der Hologrammfarbe durch TEA

Auch durch die Konzentration des TEA kann die Farbe des Hologrammes beeinflusst werden.

Farbe	Konzentration
Rot	0,5%
Orange	3,0%
Gelb-grün	4,0-5,0%
Grün	7-10%
Blau	20-30% (schmiert)

Achtung!

Stellt man ein nicht rotes Hologramm her, kann man an diesem nicht mehr (oder nur noch teilweise) die Winkelabhängigkeit der Hologrammfarbe beobachtet werden. Alle roteren Farben gehen verloren!

A.2 Kopiervorlagen für die Schule

A.2.1 Materialien für den Unterricht

- Schülerskript
- Overheadfolien
- Arbeitskopien

Begleitskript zur Unterrichtsreihe Holografie

Kerstin Grieger
Institut für Physik, AG Larissa, Johannes Gutenberg Universität-Mainz

1 Räumliches Sehen

1.1 Einführung

Das räumliche Sehvermögen in näherer Umgebung (weniger als 20 Meter) kann darauf zurück geführt werden, dass wir mit unseren zwei Augen jeweils ein leicht versetztes Bild sehen. Mit dem rechte Auge sehen wir den jeweiligen Gegenstand etwas weiter von rechts, mit dem linken etwas weiter von links. Unser Gehirn setzt diese beiden zweidimensionalen Bilder dann zu einem dreidimensionalen Bild zusammen. Das Gehirn nutzt neben den unterschiedlichen Sichtwinkeln auch noch andere Anhaltspunkte wie zum Beispiel die scheinbare Größe eines bekannten Gegenstandes, doch diese Zusatzinformationen besitzen gerade in näherer Umgebung eine geringere Bedeutung.

1.2 Drei dimensionale Bilder



Die wohl bekannteste Variante der 3D Bilder sind die Rot/Cyan Bilder (Cyan ist ein Blauton). Die geläufige Abkürzung 3 D steht dabei für 3 Dimensionen, d.h. die entsprechende Abbildung zeigt die Breite, die Höhe und die räumliche Tiefe. Das Bild, das das rechte Auge später sehen soll wird dabei Cyan, das andere Rot eingefärbt. Trägt man eine Rot/Cyan Brille, sieht jedes Auge nur das für es bestimmte Bild. Das Gehirn setzt nun aus den beiden zweidimensionalen Bildern ein dreidimensionales Bild zusammen. Betrachtet man mit einer Rot/Cyan Brille das unten abgebildeten Rot-Cyan Bild zweier Elefanten (Abb. 1.1), so erscheint das Bild dreidimensional.



Abbildung 1.1: Rot/Cyan Bild zweier Elefanten

1.3 Diffuse Reflektion und Reflektion im Wellenmodell

Trifft Licht auf einen Gegenstand, zum Beispiel auf eine Porzellanfigur einer Katze, so wird es in alle Richtungen reflektiert. Dadurch können zwei Personen aus verschiedenen Richtungen gleichzeitig jeweils einen bestimmten - den Ihnen zugewandten - Teil der Oberfläche sehen. Aber wie kann das sein? Es gilt doch „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“?

Dieser scheinbare Widerspruch zum Reflektionsgesetz lässt sich leicht aufklären, indem man sich die rauhe Oberfläche eines Objektes aus vielen kleinen Spiegelflächen zusammengesetzt vorstellt, die in verschiedene Richtungen stehen. Trifft nun ein Strahlenbündel auf einen Teil des Objektes, so werden die Strahlen, je nachdem auf welches Spiegelchen sie treffen, entsprechend dem Reflektionsgesetz reflektiert (Abb. 1.2). Da die Lote der Spiegel aber in verschiedene Richtungen zeigen, zeigen die reflektierten Strahlen auch in verschiedene Richtungen.

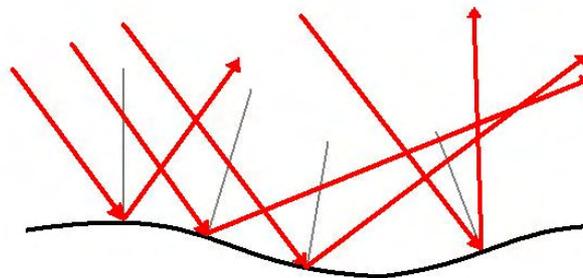


Abbildung 1.2: Diffuse Reflektion

Verblüffendes zur diffusen Reflektion:

Die diffuse Reflektion lässt sich veranschaulichen, indem man z.B. ein Modellauto hinter eine Glasscheibe setzt und es exemplarisch aus drei verschiedenen Richtungen betrachtet. Markiert man jedesmal diejenige Stelle auf der Glasscheibe, an der man z.B. das Hinterrad des Modells sieht, so fällt auf, dass aufgrund der diffusen Reflektion die Information „Hinterrad“ an drei verschiedenen Punkten der Platte zu sehen ist (Abb. 1.3).



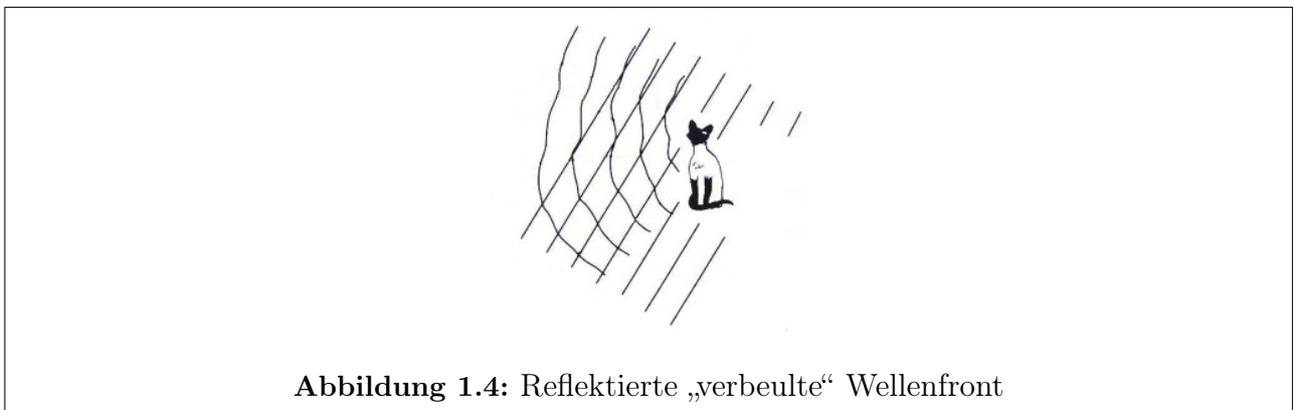
Abbildung 1.3: Die Information „Hinterrad“ ist an mehreren Punkten der Platte zu sehen.

Würde man diesen Vorgang mit immer neuen Sichtwinkeln wiederholen, so wäre nach einer gewissen Zeit fast die ganze Platte markiert. Genauso verhält es sich mit der Windschutzscheibe des Autos und allen anderen Punkten seiner Oberfläche.

An jedem Punkt der Glasscheibe kommt die Information jedes Punktes der Oberfläche eines Gegenstandes an.

Reflektion im Wellenmodell:

Wenn man nun zusätzlich noch die wellige Eigenschaft des Lichtes hinzunimmt, kann man mit dem Huygens'schen Prinzip (siehe Schulbuch) erklären, dass das an einem realen Objekt in alle Richtungen reflektierte Licht sich zu einer kugelförmigen, „verbeulten“ Wellenfront zusammensetzt. In der Abbildung 1.4 ist eine von links nach rechts laufende Wellenfront gezeichnet, die auf die Katze trifft, als verbeulte Wellenfront reflektiert wird und sich weiter ausbreitet.



Diese verbeulte Wellenfront beinhaltet die Information, wie die Oberfläche der Katze aussieht.

Wenn man die Katze ansieht, sich selbst und die Katze dabei nicht bewegt, dann trifft in jedes Auge immer der gleiche Ausschnitt dieser verbeulten Wellenfront. Jeder dieser Ausschnitte liefert dabei ein zweidimensionales Bild. Die Bilder, die die beiden Augen dann sehen, werden dann von unserem Gehirn zu einem 3D Bild zusammengesetzt.

1.4 Rot/Cyan Bilder und Hologramme im Vergleich

Rot/Cyan Bilder reflektieren nur die beiden Ausschnitte der ursprünglichen Wellenfront, die das 3D Bild aus einer bestimmten Blickrichtung darstellen. Diese Information reicht aus um die Illusion der Tiefe zu erzeugen, allerdings kann man dabei das Objekt nur aus einer vorgegebenen Blickrichtung betrachten.

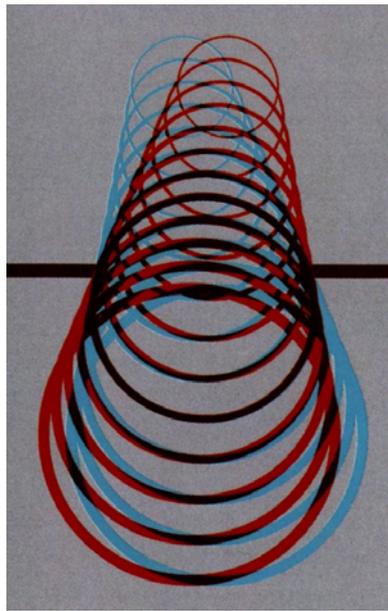


Abbildung 1.5: Rot/Cyan Bild einer Spirale

Dieser Effekt kann leicht ausprobiert werden, indem man das oben gezeigte Bild (Abb. 1.5) mit einer Rot/Cyan Brille betrachtet. Wenn man versucht, es von der Seite anzuschauen, wandert die Öffnung der Spirale mit. Aus jedem Blickwinkel zeigt die Öffnung der Spirale zum Betrachter.

Um das Bild auch von der Seite betrachten zu können, müsste das Bild die ganze Wellenfront des ursprünglichen Objekts imitieren. Wie in Abbildung 1.6 gezeigt, ist dies bei Hologrammen möglich.



Abbildung 1.6: Fotos eines Hologrammes aus verschiedenen Blickwinkeln

Ein Hologramm reproduziert die gesamte Wellenfront, die es vorher gespeichert hat. Das heißt, es reflektiert das Licht genauso wie der dargestellte Gegenstand.

Die vom Hologramm reflektierte Wellenfront ist absolut identisch zu der des Gegenstandes. (Siehe dazu auch Kap. 2.6)

2 Holografie - Speicherung und Reproduktion der Wellenfront eines Objekts

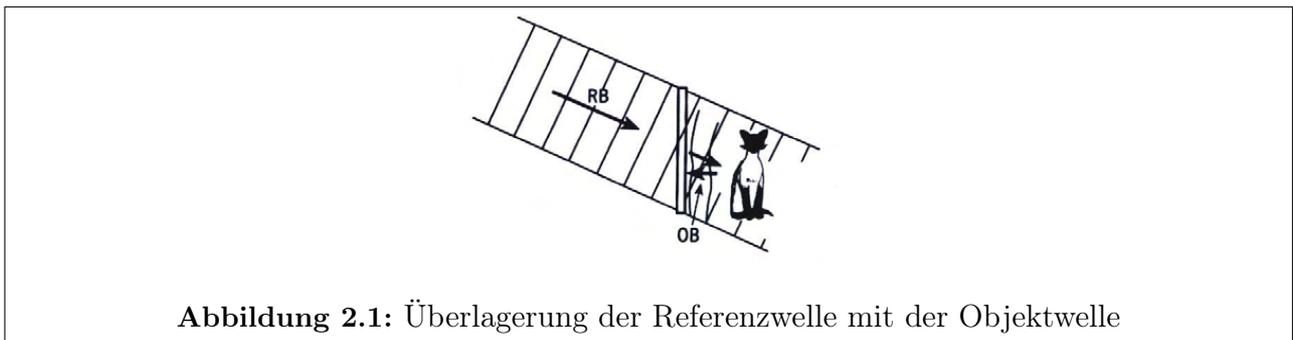
2.1 Einführung

Holografie ist eine Technik zur Herstellung dreidimensionaler Bilder. Diese Bilder zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass sie die ganze Wellenfront des ursprünglichen Objektes rekonstruieren. In diesem Kapitel geht es nun darum, wie die Wellenfront eines Objekts gespeichert und dann von einem Hologramm wieder ausgegeben werden kann.

2.2 Speicherung der Wellenfront

Die Form einer Wellenfront ist abhängig von den Amplituden und der Phase zwischen den Elementarwellen, aus der die Wellenfront besteht. Die Phase kann gespeichert werden, indem man die Wellenfront mit einer anderen Welle, der sogenannten **Referenzwelle**, vergleicht. Dazu überlagert man der **Objektwelle**, die die Information des Objektes trägt, eine Referenzwelle, die überhaupt keine Information besitzt. Durch diese Überlagerung entsteht in dem Gebiet, in dem sich die Wellen treffen, ein kompliziertes Interferenzmuster (siehe Schulbuch: Interferenz). Dieses Interferenzmuster enthält die Information, welche Form die Wellenfront des Objektstrahls besitzt.

Dieses Interferenzmuster soll nun gespeichert werden. Dazu wird, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, eine Holografieplatte in das Gebiet gestellt, in dem sich die Wellen überlagern.



2.2.1 Holografieplatte

Die Holografieplatte besteht aus einer Glasplatte, auf der auf einer Seite eine Emulsionsschicht aufgetragen ist. Auf welcher Seite der Platte die Emulsionsschicht aufgetragen ist, kann leicht durch anhauchen festgestellt werden. Die Seite der Platte, die nicht beschlägt, ist die Emulsionsseite. Die lichtempfindliche Emulsionsschicht besteht aus Gelantine, in der Silberbromidkristalle, die kleiner als 25nm sind, unregelmäßig eingebettet sind. Man kann sich dies wie einen Schwamm (= Gelantine) vorstellen, nur anstelle der Löcher sitzen kleine Kugeln (= Kristalle).

Die Silberbromidkristalle sind wie in der Abbildung 2.2 gezeigt aufgebaut. Die „Stäbe“ zwischen den Silber- und Bromatomen sind dabei eine in der Chemie übliche Darstellung von Ionenbindungen.

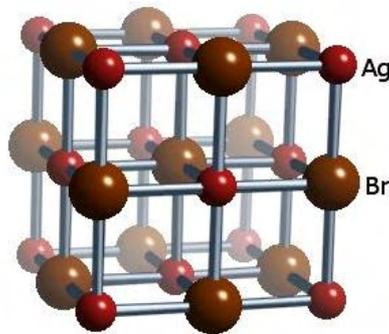


Abbildung 2.2: Kristallgitter von Silberbromid

2.2.2 Belichtung der Holografieplatte

Beim so genannten **Belichten** der Platte trifft durch die Interferenz der Referenzwelle und der „verbeulten“ Objektwelle auf manche Stellen der Platte besonders viel Licht, auf andere gar kein Licht auf. Die Stellen, die besonders viel Licht und damit besonders vielen Photonen ausgesetzt sind, betrachten wir nun näher. Trifft ein Photon auf ein Silberbromidkristall, so kann das Photon durch ein Elektron absorbiert werden (siehe Schulbuch: äußerer Photoeffekt oder Lichtelektrischer Effekt). Dieses Elektron hat nun genügend Energie, um sich aus dem Verbund zu lösen. Dadurch bricht eine der Verbindungen zwischen einem Bromanion und einem Silberkation auf. Das nun freie Elektron wird von dem am nächstliegenden Silberanion wieder angezogen. Zusammen werden sie zu einem neutralen Silberatom, das nun ungebunden im Kristall sitzt. Das Kristallgitter dieser Kristalle wird stellenweise zerstört.

Die Kristalle, die an Stellen der Platte sitzen auf die kein Licht trifft, bleiben unverändert.

An den Stellen, an denen Licht auf die Platte trifft, verändern sich die Kristalle, an den anderen nicht. Das Interferenzmuster der Referenz- und Objektwelle ist gespeichert.

Die lichtempfindliche Emulsionsschicht trägt nach der Belichtung schon die gesamte Information des belichteten Gegenstandes. Um dieses latente Bild sichtbar zu machen, muss das Bild erst entwickelt werden (ähnlich wie bei der Entwicklung eines Filmes vom Fotoapparat).

2.3 Ergänzung: Lichtquelle zur Aufnahme eines Objektes

Die reflektierte Wellenfront des Objektes gibt uns sowohl Informationen über die Form des Gegenstandes als auch über die Lichtquelle, die es bestrahlt. Damit die reflektierte Wellenfront des Gegenstandes während der Belichtung gleich bleibt, muss die Lichtquelle immer das „gleiche

Licht“ ausstrahlen. Die Lichtquelle muss monochromatisch und kohärent sein. Der Laser erfüllt diese Ansprüche, er wird daher zur Aufnahme der Hologramme genutzt.

2.4 Entwicklung des Hologrammes

Die Entwicklung eines Hologrammes wird in drei Schritten (entwickeln, stoppen und bleichen), ähnlich der Entwicklung von schwarz-weiß Negativen eines Fotoapparates, vorgenommen. Bei jedem dieser Schritte wird das Hologramm im entsprechenden Bad geschwenkt, um eine möglichst gleichmäßige Reaktion zu erhalten.

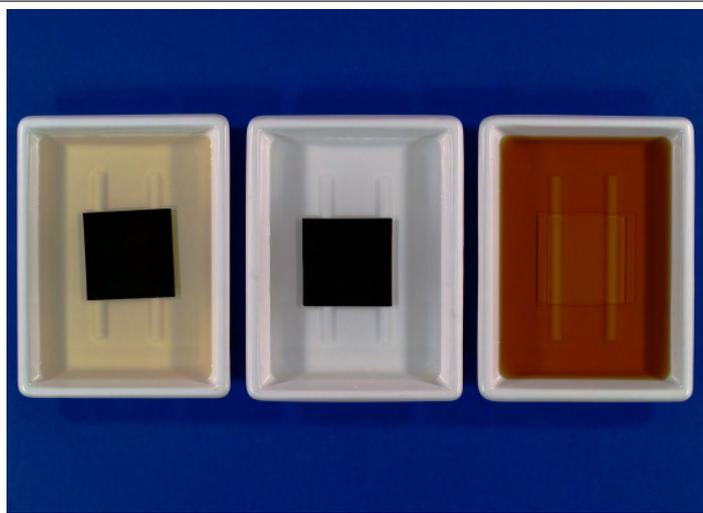


Abbildung 2.3: Verfärbung der Holografieplatte in den verschiedenen Entwicklungsbädern. Von links nach rechts: Entwicklungsbad, Stoppbad, Bleichbad

Zunächst wird die Holografieplatte im Entwicklungsbad geschwenkt. Der Entwickler reduziert positive Silberionen zu Silber. Kristalle, die schon ein neutrales Silberatom besitzen, beschleunigen die Reaktion des Entwicklers. Wird die Holografieplatte im Entwicklungsbad geschwenkt, werden daher hauptsächlich die bereits belichteten Kristalle, in denen schon neutrale Silberatome vorhanden sind, entwickelt. D.h. alle Silberionen der belichteten Kristalle werden zu Silber reduziert. Während des Entwickelns ist der Vorgang daran zu beobachten, dass die entstehenden Silberatome die Schicht schwarz färben (Abb. 2.3 links).

Die Abbildung 2.4 zeigt einen Ausschnitt eines Hologrammes nach dem Entwicklungsbad. Anhand dieser Abbildung kann man deutlich sehen, wie das Interferenzmuster in der Emulsion gespeichert ist. Die als schwarze Punkte zu erkennenden Silberkristalle sind in Streifen unregelmäßig angeordnet. Diese Streifen waren bei der Belichtung hoher Lichtintensität ausgesetzt. Dennoch befinden sich innerhalb des Streifens, auch Stellen, an denen keine schwarze Punkte zu sehen sind. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass an diesen Stellen bei der Belichtung keine Silberbromidkristalle in der Emulsionsschicht saßen.

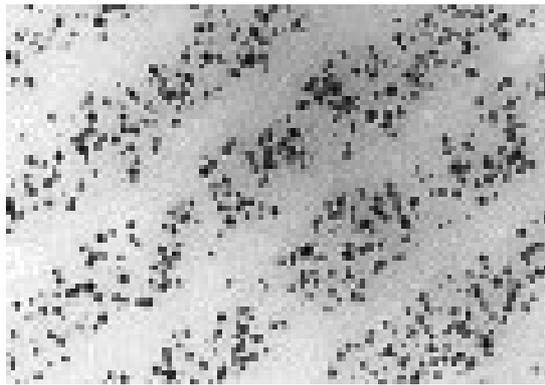


Abbildung 2.4: Elektronen Mikroskopaufnahme eines entwickelten Hologrammes. Deutlich sind die in einem Band unregelmäßig angeordneten Silberkristalle zu sehen. Entnommen aus <http://cabd0.tripod.com/holograms/index.html>

Im **Stoppbad** wird das Entwicklungsbad vom Hologramm abgewaschen und der Entwicklungsvorgang gestoppt (Abb. 2.3 mitte).

Im **Bleichbad** werden die Silber-Atome vollständig aus der Gelatineschicht herausgewaschen. Die unbelichteten Silberbromidkristalle bleiben davon unberührt. Das Herauswaschen des Silbers kann man beim Bleichen beobachten: die Fotoplatte wird nach und nach völlig transparent (Abb. 2.3 rechts).

Die Emulsionsschicht wird beim Bleichen sozusagen „durchlöchert“. Stellt man sich das wieder wie einen Schwamm mit Kugeln vor, dann fehlen jetzt ein paar Kugeln, an dieser Stelle sind nun Löcher.

2.5 Reproduktion des Gegenstandes - oder: Warum sieht man das Bild?

Bei der Betrachtung trifft Licht auf die nun nicht mehr lichtempfindliche Schicht und wird, abhängig von dem „Lochmuster“, in der Emulsion reflektiert. Physiker können mathematisch beweisen, dass die reflektierte Wellenfront des Hologrammes exakt die selbe Form hat wie die Wellenfront des eigentlichen Gegenstandes.

Da die Wellenfront des Hologrammes und die des Objektes identisch sind, können wir oft nicht feststellen, ob es sich um einen echten Gegenstand oder um ein Hologramm handelt (Abb. 2.5). Man hat das Gefühl man könnte den Gegenstand, den man im Hologramm sieht, anfassen. Tut man das, greift man jedoch ins Leere.

2.6 Warum erscheint das Hologramm in 3D?

Genau wie bei einem realen Objekt kommt der 3D Effekt bei einem Hologramm dadurch zustande, dass jedes Auge jeweils ein etwas anderes Bild sieht. Das Gehirn fügt diese Bilder wieder zu einem dreidimensionalen Bild zusammen. Wenn man das Hologramm von der Seite betrachtet,

2.7 Warum sieht man das Hologramm nur unter einer Lichtquelle?

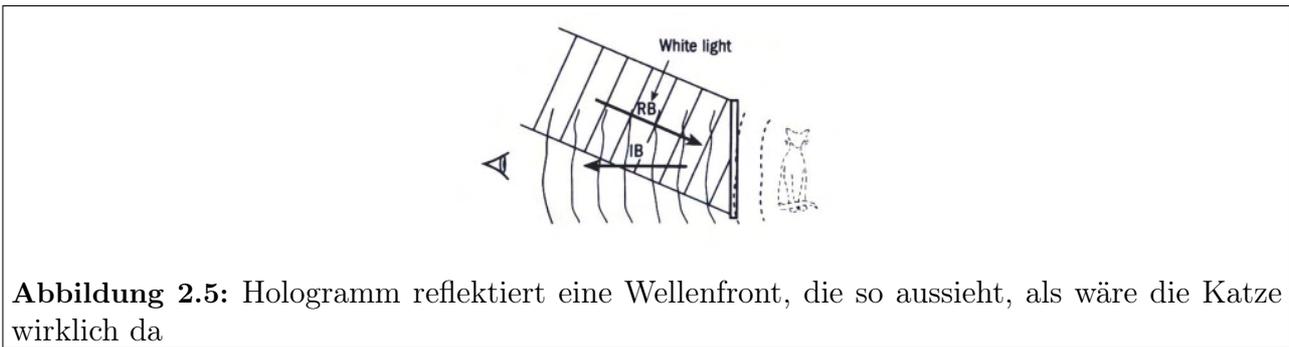


Abbildung 2.5: Hologramm reflektiert eine Wellenfront, die so aussieht, als wäre die Katze wirklich da

treffen wie beim realen Objekt andere Ausschnitte der Wellenfront in unsere Augen. Wir sehen den Gegenstand im Hologramm ebenfalls von der Seite.

2.7 Warum sieht man das Hologramm nur unter einer Lichtquelle?

Um das Hologramm betrachten zu können, muss es von der gleichen Seite angestrahlt werden wie beim Belichten. In Räumen kommt das Licht dagegen von vielen verschiedenen Richtungen. Oft sind mehrere Fenster im Raum oder mehrere Lampen. Dieses diffuse Licht wird zwar auch reflektiert, wenn es auf das Hologramm trifft, nur nicht so, dass die Form der Wellenfront so aussieht wie die des Gegenstandes. Daher kann man den Gegenstand im Hologramm nicht sehen.

3 Sicherheitsbelehrung

Die größte Gefahrenquelle bei den hier durchgeführten Arbeiten stellt nicht der Laser oder die Chemikalien dar, sondern die „normale“ Steckdose. Ein Stromstoß führt zu Fehlfunktionen der Körperorgane, z.B. zur Verkrampfung der Muskeln oder zum lebensgefährlichen Herzkammerflimmern. Die Verkrampfung der Handmuskulatur hat dabei zur Folge, dass man den stromführenden Gegenstand nicht mehr loslassen kann und somit andauernder Schädigung ausgesetzt ist. Trotzdem ist eine kleine Sicherheitsbelehrung zum Laser und den Chemikalien nötig, da die Arbeit damit ungewohnt ist.

3.1 Laser

Beim Umgang mit Lasern ist zu beachten, dass Laser unterschiedlich gefährlich sind. Bei dem Versuchsaufbau zur Holografie wird eine Laserdiode mit einer Leistung von 1mW genutzt. Dies ist die maximale Leistung, die für Schulen zugelassen ist. (Im Vergleich dazu: Lasershows arbeiten mit Lasern, die eine Leistung von 3W besitzen.) Laser mit einer Leistung von 1mW gelten bei einer Bestrahlung bis zu 0,25 s als ungefährlich. Bis auf die Augen ist nichts bei der Bestrahlung gefährdet. Um ihre Augen zu schützen, vermeiden sie daher unbedingt, direkt in den Laserstrahl zu schauen.

Falls es doch passiert: keine Panik! Der Lidschlussreflex des Auges ist schnell genug, um eine Schädigung des Auges zu verhindern. Sobald dieser Reflex ausgelöst wurde, einfach die Augen geschlossen halten und den Kopf aus der Gefahrenzone nehmen.

Außerdem sollte Schmuck (Uhren, Ringe, Ketten, Ohringe, wenn möglich auch Brille) unbedingt abgelegt werden, um unkontrollierte Reflektionen des Laserstrahls zu vermeiden.

3.1.1 Chemie

Beim Arbeiten mit Chemikalien ist generell darauf zu achten, dass im Labor bzw. in der Dunkelkammer weder gegessen noch getrunken wird. Es kann gesundheitsschädigend sein, Chemikalien zu verzehren, auch wenn es nur Spuren sind.

Es sind noch einige weitere Regeln zu beachten:

1. Schutzkleidung: die Bäder sind leicht ätzend, tragen sie daher Handschuhe und Kittel.
2. Das Arbeiten mit den Chemikalien ist nur in Anwesenheit einer Aufsichtsperson gestattet.
3. Bei unvorhergesehenen Zwischenfällen, wie z.B. Unwohlsein oder Verletzungen, ist sofort die Aufsichtsperson zu informieren.
4. Auf andere Teilnehmer des Praktikums ist Rücksicht zu nehmen.

5. Jeder Teilnehmer übernimmt bei Beginn seines Arbeitsganges die Verantwortung für seine Tätigkeiten.
6. Beim Arbeiten mit Säuren und Basen ist Vorsicht geboten, da diese eine ätzende Wirkung haben. Sollte es vorkommen, dass Säure oder Base auf die Haut oder in die Augen gelangen, ist diese Lösung sofort mit viel Wasser abzuspülen.

4 Herstellung von Hologrammen und Behandlung der Platten

4.1 Hinweise

Dies ist eine Kurzanleitung zur Herstellung von Hologrammen und Behandlung der Holografieplatten. Sie ist bewusst sehr knapp geschrieben, um ihre Nutzung während des Versuches zu erleichtern.

Die vorgestellten Arbeiten müssen im Grünlicht stattfinden, denn die Holografieplatten sind für rotes Licht empfindlich. Vermeiden Sie unbedingt versehentliche Belichtungen! Nutzen Sie dazu bei Verlassen des Raumes die Türschleuse und die schwarzen Kartons und schwarzen Plastiktüten, die ihnen zur Verfügung gestellt werden, um die Holografieplatten zu schützen! Beachten Sie auch, dass weißes Licht rotes Licht enthält!

Fassen Sie nie auf die Emulsionsschicht! Halten Sie die Holografieplatten an den Kanten der Platte!

Feststellung der Emulsionsseite: Platte anhauchen
schlägt an -> normale Glasseite
schlägt nicht an -> Emulsionsseite

4.2 Herstellung von Hologrammen

Führen sie folgende Schritte nacheinander aus.

Objekt mit einer Testplatte justieren: Platte direkt auf das Objekt legen. Platte darf nicht wackeln oder herunterrutschen! Hologramm und Objekt müssen vom Laser vollständig und möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein!

Messung der Laserleistung: Die Laserleistung kann mit einem Photometer (das zur Verfügung gestellt wird) gemessen werden. Dazu wird die Photodiode direkt über die Platte gehalten. Drückt man den Knopf am Photometer, kann an der Anzeige die Leistung pro cm^2 abgelesen werden. Die Messbereiche können mit Hilfe eines Drehschalters verstellt werden.

Platten austauschen: Nehmen Sie die Testplatte vom Objekt und legen Sie statt dessen die Holografieplatte auf das Objekt. Die Emulsionsseite muss nach unten zeigen.

Wartezeit: 2 Minuten, Tisch in dieser Zeit nicht berühren! Jede noch so kleine Bewegung des Objektes kann die Aufnahme zerstören!

Belichtung: siehe Aufgabenblatt und erinnern Sie sich an ihre Hausaufgaben

Chemische Entwicklung der Holografieplatten: In alle Bäder müssen die Platten mit der Emulsionsseite nach oben hineingelegt werden. Da Sie Handschuhe tragen, können Sie die Platten direkt mit den Händen in die Bäder legen und herausholen. Damit die Bäder möglichst gleichmäßig auf die Emulsionsschicht wirken können, müssen die Becken durchgängig leicht geschwenkt werden. Beim Herausnehmen aus den jeweiligen Becken müssen Sie sich merken, welche Seite die Emulsionsseite ist. Lassen Sie außerdem die Platten einwenig abtropfen, sonst haben Sie irgendwann nicht mehr genügend Flüssigkeit in den Becken!

Entwicklung: 3 min

Stoppbad: 30 s

Bleichbad: bis die Holografieplatte komplett durchsichtig erscheint - lieber zu lang als zu kurz

Spülen: ca. 2 min im Wasserbecken bewegen

Die Holografieplatten sind nun lichtunempfindlich.

Abtrocknen: Legen Sie die Holografieplatte mit der Emulsionschicht nach oben auf ein Küchentuch. Falten Sie ein weiteres Küchentuch, so dass Sie eine gerade ca. 5cm lange Kante haben. Halten Sie das Hologramm an zwei Ecken vorsichtig fest. Ziehen Sie die Kante des Küchentuchs von ihrer Hand weg über die Emulsion. Schlagen Sie das Tuch um, so dass Sie eine neue trockene Kante des Küchentuchs haben und wiederholen Sie den Vorgang. Schlagen Sie das Tuch erneut um und wiederholen Sie den Vorgang mit trockenem Tuch an der Stelle, an der Sie zuvor das Hologramm festgehalten haben. Die Glasseite können Sie einfach abwischen. Prüfen Sie im Licht, ob noch Wassertropfen auf der Platte sind, falls ja, trocknen Sie sie.

Föhnen: Trocknen Sie bei Bedarf ihr Hologramm noch mit kalter Luft weiter.

Die Hologramme sind nun fertig und können unter einer Halogenlampe (anderer Raum!) betrachtet werden.

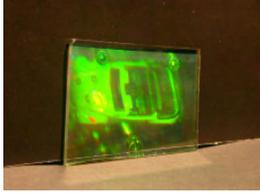
4.3 Sonstiges:

Holografieplatten schneiden: Schneiden sie an einem möglichst markantem Punkt die Holografieplatte durch (Nasenspitze einer Figur, durch einen Reifen eines Autos...). Legen Sie dazu die Holografieplatte mit der Emulsionsseite nach unten(!) auf ein Küchentuch. Legen sie ein Lineal auf die Holografieplatte und setzen sie den Glasschneider senkrecht auf. Ritzen Sie von oben nach unten die Holografieplatte ein. Schieben Sie die Holografieplatte zum Tischrand, und brechen Sie sie an der Tischkante entlang ab (zum Schutz vor **herumfliegenden Splittern** Küchentuch auflegen!).

Transport: In ein Küchentuch einwickeln, wenn möglich in ein Buch legen.

Einrahmen: Rahmen Sie ihr Hologramm ein. Hinterlegen Sie es mit einem schwarzen Karton und achten Sie darauf, dass die Emulsionsseite zum Karton zeigt. Falls Sie es im Rahmen fixieren müssen, kleben Sie mit etwas Tesafilm das Hologramm auf der Glasseite(!) auf den Karton.

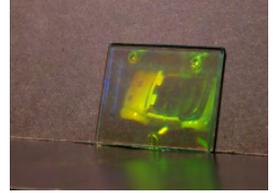
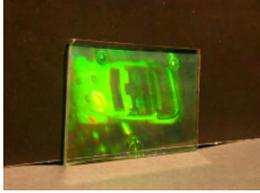
Unterrichtsreihe „Holografie“



Überblick über den Inhalt der nächsten 6 Stunden:

1. Warum können wir räumlich Sehen?
2. Wie speichert ein Hologramm das Aussehen eines Gegenstandes?
3. Warum sehen wir ein 3 dimensionales Hologramm in einer Platte?
Wie werden Hologramme hergestellt?
4. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung
5. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung
6. Welche Anwendungen gibt es zur Holografie?

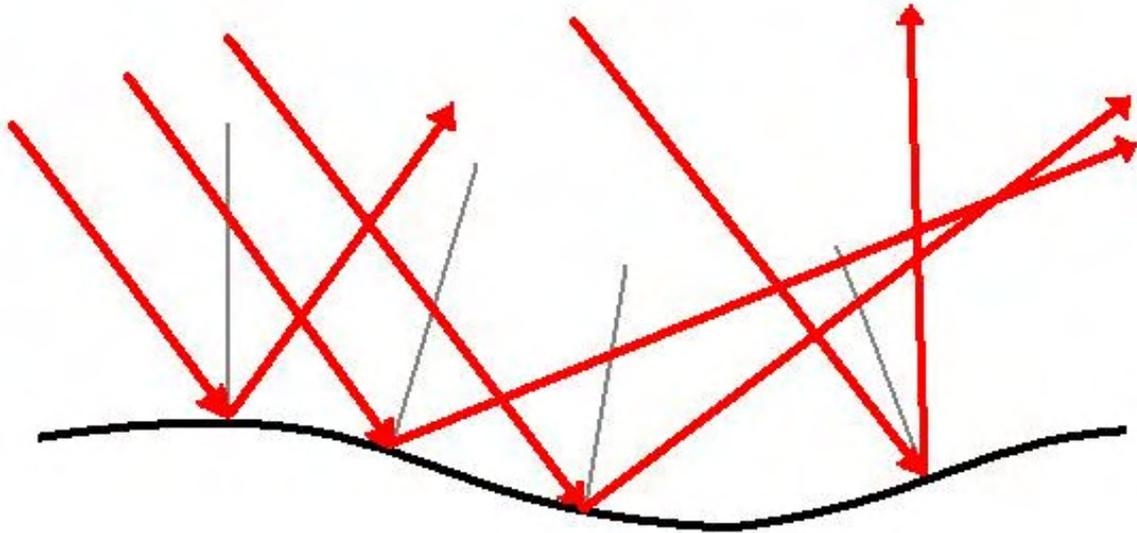
Unterrichtsreihe „Holografie“



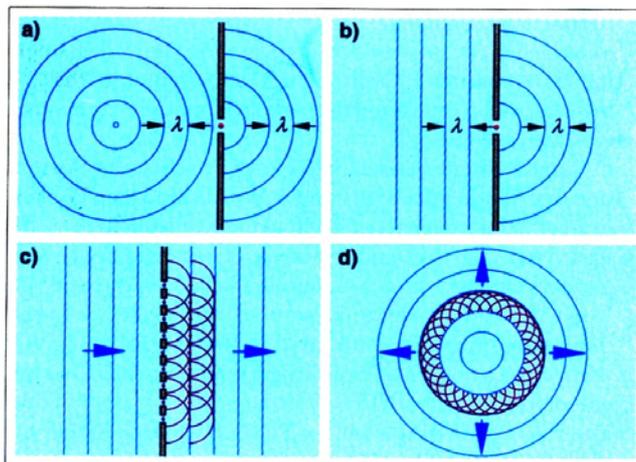
Überblick über den Inhalt der nächsten 8 Stunden:

1. Warum können wir räumlich Sehen?
2. Wie speichert ein Hologramm das Aussehen eines Gegenstandes?
3. Warum sehen wir ein 3 dimensionales Hologramm in einer Platte?
Wie werden Hologramme hergestellt?
4. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung Teil 1
5. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung Teil 1
6. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung Teil 2
7. Herstellung von Hologrammen und Leistungsbeurteilung Teil 2
8. Welche Anwendungen gibt es zur Holografie?

Diffuse Reflektion

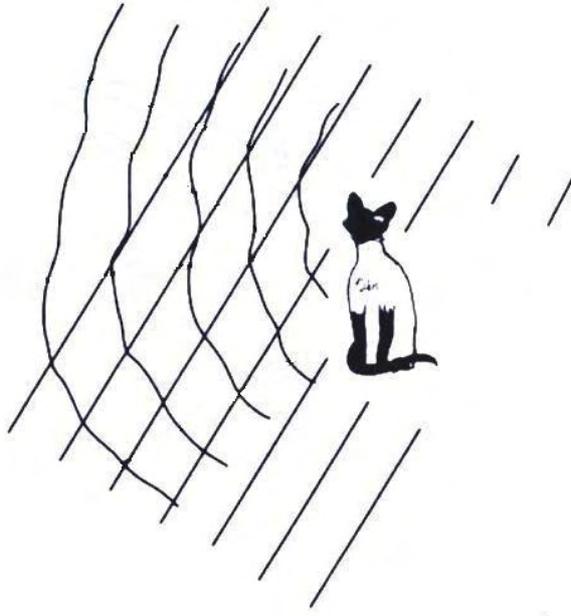


Huygen'sches Prinzip

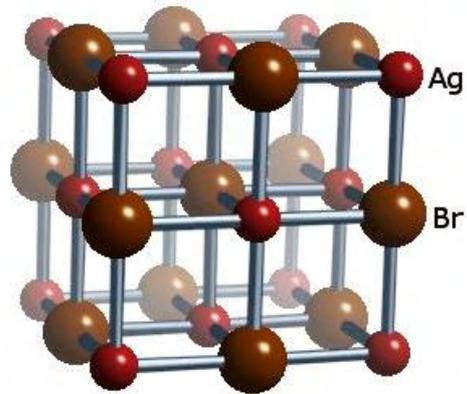


134.1 Huygens'sches Prinzip: Bei Kreiswellen (a) und bei geraden Wellen (b) kann jeder Punkt der Wellenfront als Zentrum einer Elementarwelle angesehen werden. Die von einer Wellenfront ausgehenden Elementarwellen setzen sich zu einer neuen geraden Wellenfront (c) bzw. zu einer kreisförmigen Wellenfront (d) zusammen.

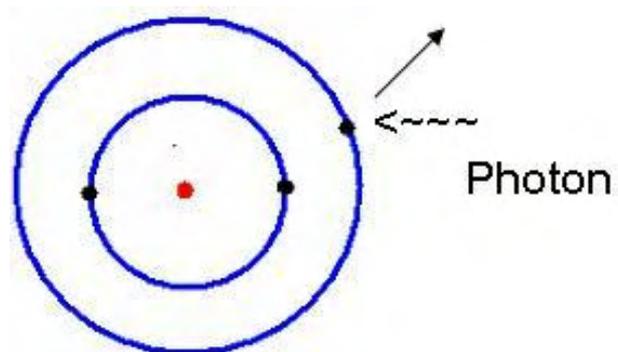
Reflektierte Wellenfront



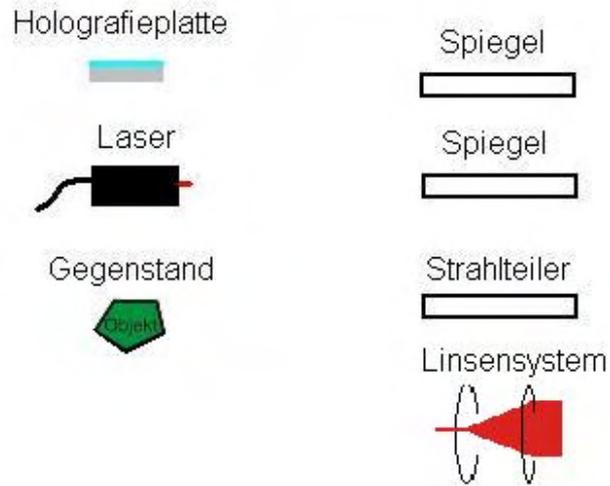
Kristallgitter von Silberbromid



Äußerer Fotoeffekt

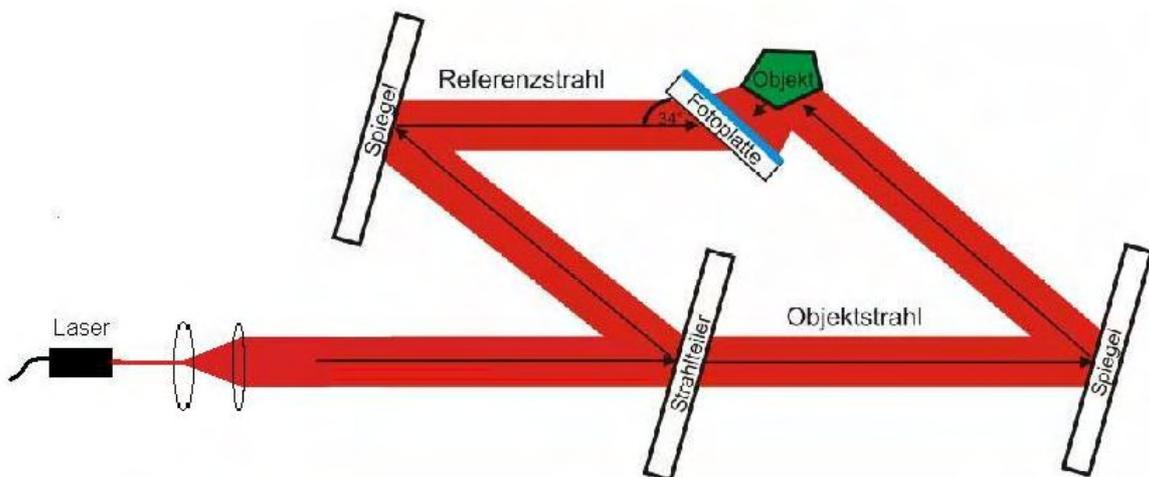


Einzelteile des Holografieaufbaus

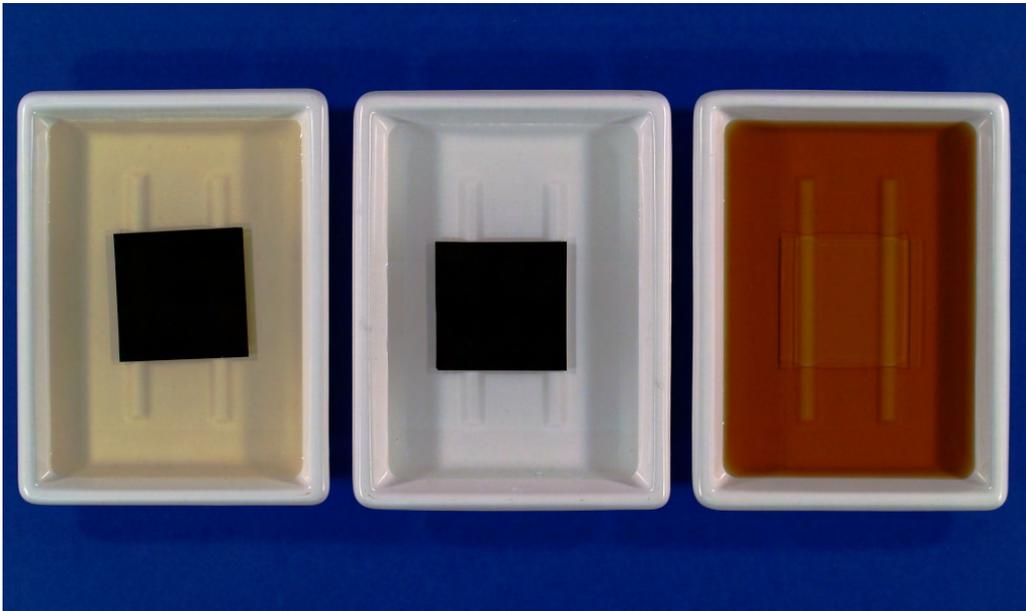


Achtung! Die Objektwelle und die Referenzwelle müssen von unterschiedlichen Seiten auf die Platte treffen!

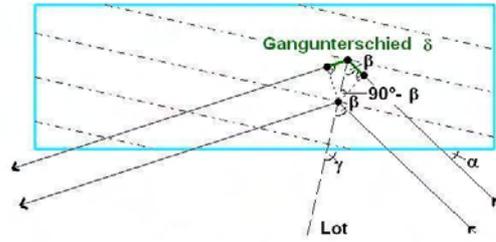
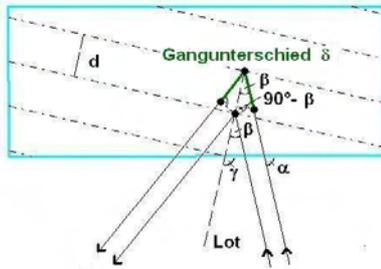
Zweistrahl - Holografieaufbau



Holografieplatte im Entwicklungs-, Stopp- bzw. Bleichbad



Braggbedingung bei der Rekonstruktion an einem Reflektionshologramm



Bragg Bedingung:

$$k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\beta)$$

Geeignete und ungeeignete Objekte



Objekte oder abzulichtende Objektteile müssen kleiner als die Holografieplatte (Plattenmaße: 6,34 cm * 6,34 cm) sein.

Objekte aus folgenden Materialien sind geeignet:
Metall, Hartplastik, Keramik, Gips, auch Muscheln

Objekte aus folgenden Materialien sind ungeeignet:
Holz, Gummi, Weichplastik, Glas, Stoff, auch Pflanzen

Objekte mit folgenden Eigenschaften sind ungeeignet:
durchsichtig, schwarze Farbe, glatte glänzende Flächen

Arbeitskopien

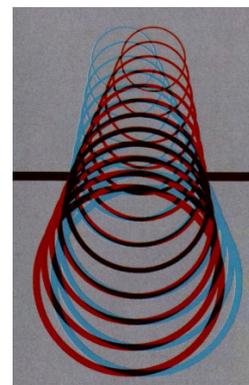
Foto eines Modellautos



Stereoskopische Bilder



links: rot/cyanes Rechteck, rechts: Stereoskopische Spirale



A.2.2 Materialien zur Leistungsbeurteilung

- Arbeitsblätter Grundkurs
- Musterlösung Grundkurs
- Arbeitsblätter Leistungskurs Teil 1
- Musterlösung Leistungskurs Teil 1
- Arbeitsblätter Leistungskurs Teil 2
- Musterlösung Leistungskurs Teil 2
- Arbeitsblätter Leistungskurs Teil 2 schriftlich
- Bewertungsbogen

Name:

Name des Gruppenpartners:

Aufgaben und Experimentieranleitung zur Holografie

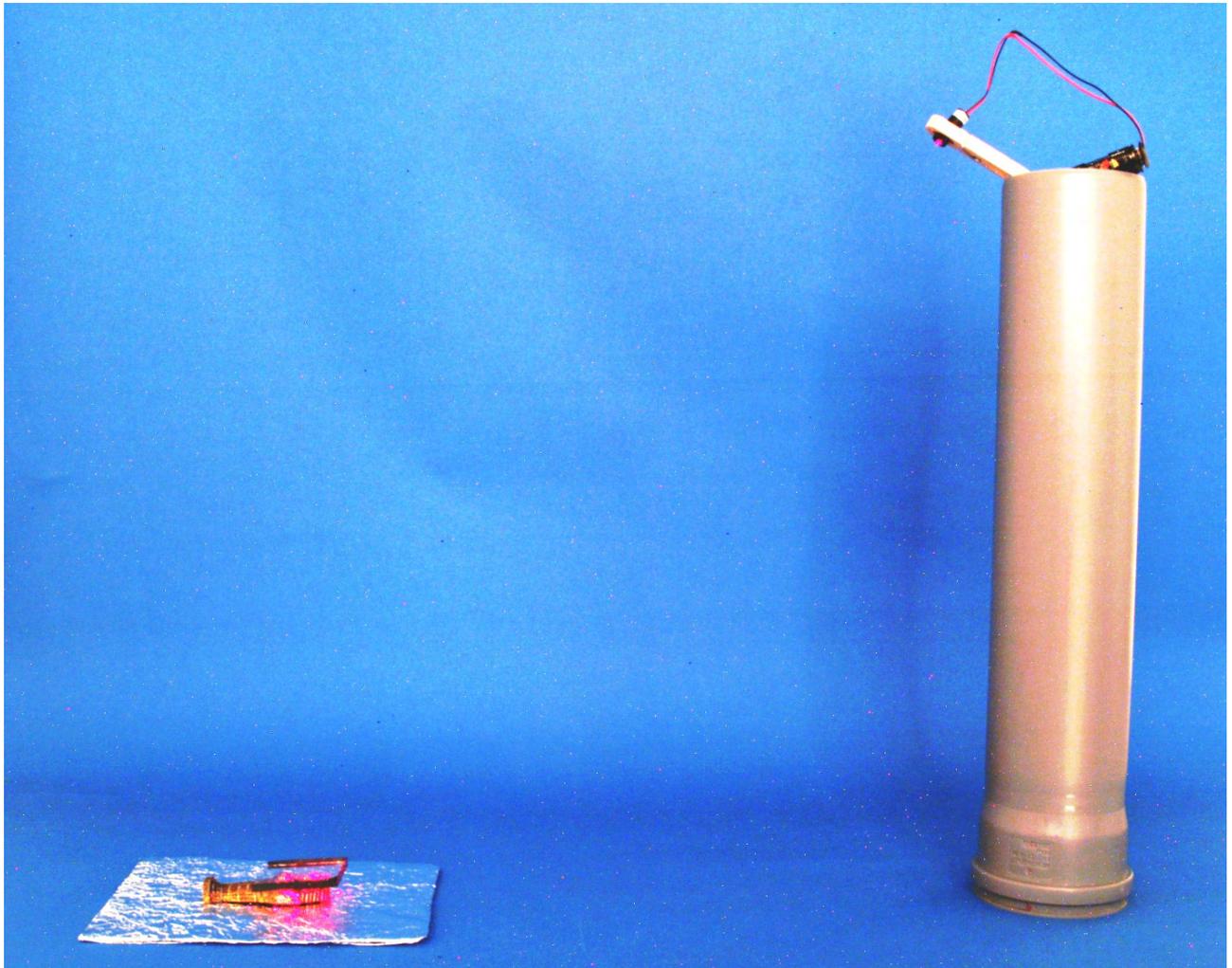
Wichtige Hinweise:

- Während des Versuches dürfen Sie das **Kapitel 4** des Skriptes nutzen.
- Die Symbole ,  stehen für praktische bzw. schriftliche Aufgaben.
- Ihre Antworten sollten nicht länger als 3 bis 4 Sätze sein.
- Achten Sie auf die Zeit!
- Für die **Beantwortung des Tests** und die **Abholung der Versuchsmaterialien** sind zusammen **15 min** vorgesehen - danach sollten sie mit den Versuchen beginnen und „Leerlaufzeiten“ nutzen um eventuelle Lücken im Test zu vervollständigen.

Holen Sie sich pro Gruppe folgende Versuchsmaterialien:

- Rohr, gefüllt mit Sand
- 3 Plastikschaalen, mit: Laserdiode, Batterien, Holzklammer, Testplatte, 3 Karteikarten, schwarze Knete im Handschuh, schwarze Tüte, Lampenhalterung, Holzblöcke um die Lampenhalterungen zu befestigen
- Mousepad mit Alufolie umwickelt
- 1 schwarze Pappe als „Strahlblocker“
- Entwicklungsbad, Stoppbad und Bleichbad
- 1 Rolle Zewa
- 1 Grünlichtlampe
- pro Person Kittel und Handschuhe
- 4 **Holografieplatten** (werden ausgeteilt) Bitte danach **direkt in die schwarze Tüte** legen um sie vor Licht zu schützen!

 Aufgabe 1:



Die Abbildung oben zeigt den Versuchsaufbau, mit dem Sie heute Hologramme belichten.

1. Wie Sie wissen, werden für die Aufnahme von Hologrammen verschiedene Wellen benötigt. Zeichnen Sie den Weg, den diese Wellen zurücklegen müssen, in das Bild des Aufbaus ein und beschriften Sie sie!
2. Erläutern Sie kurz, wozu die verschiedenen Wellen nötig sind.
3. Was hat der Photoeffekt mit der Belichtung der Holografieplatte zu tun?



Aufgabe 2:

Sie arbeiten mit einer Laserdiode die eine Leistung von 1mW besitzt.



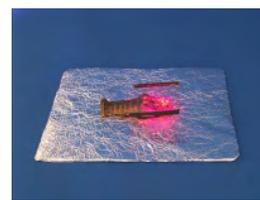
1. Welche Verhaltensregel gilt im Umgang mit Lasern?
2. Welche Schutzmaßnahmen reichen bei der hierbenutzen Laserdiode aus?
3. In welchem Bereich des Aufbaus ist der Laserstrahl am gefährlichsten? Bedenken Sie dabei, dass der Laserstrahl direkt an der Laserdiode aufgeweitet wird.



Aufgabe 3:

Nehmen Sie den Aufbau in Betrieb! Führen Sie dazu nacheinander folgende Schritte aus.

Achtung: Laser!



Legen Sie Ihren Schmuck ab (Uhren, Ringe, Ketten...). Er könnte den Laserstrahl unkontrolliert reflektieren.

- Stecken Sie die Holzklammer in das mit Sand gefüllte Rohr und klemmen sie die Laserdiode darin ein. (Laserdiode noch nicht mit den Batterien verbinden, um unkontrolliertes Herumschießen zu vermeiden.)
- Legen Sie in *ca.* 1m Entfernung zum Rohr ihren Gegenstand auf das mit Alufolie umwickelte Mousepad und eine Testplatte darauf. Bei Bedarf können Sie die Knete zum justieren des Gegenstandes nutzen.

- Verbinden Sie die Batterien mit der Laserdiode.
- Justieren sie ihr Objekt und leuchten sie es vollständig und gleichmäßig aus! (Im Gehäuse der Laserdiode befindet sich eine Linse. Durch Drehen des Aufsatzes kann deren Position verändert werden.)



Aufgabe 4:

Der Hersteller der Platten gibt an, dass die Hologramme am schönsten werden, wenn sie eine Energie von $150 \mu\text{J}$ pro cm^2 erhalten.



1. Messen sie mit dem Photometer die Laserleistung an der Testplatte. Das Photometer gibt dabei die Leistung pro cm^2 an.
2. Berechnen sie aus diesen Werten die optimale Belichtungszeit!



Aufgabe 5:

Nehmen Sie ein Hologramm auf und entwickeln Sie es (Schülerskript Kapitel 4)! Beachten Sie, dass dazu die Antwort der Aufgabe 4 nötig ist.

Troubleshooting:

- **Es ist gar kein Hologramm zu sehen:** wahrscheinlich hat sich der Aufbau bewegt
- **Ein Hologramm ist da, aber viel zu schwach:** wahrscheinlich unterbelichtet - das nächste mal etwas länger belichten.
- **Hologramm ist da, aber an einer Stelle ist nichts zu sehen:** es könnte „verbrannt“ sein, diese Stelle hat zuviel Energie erhalten! Kürzer belichten oder die Platte gleichmäßiger ausleuchten.
- **Hologramm hat Flecken:** Wenn die Flecken grün oder gelb sind, wurde nicht genügend gewässert. -> Nochmals wässern und trocknen. Wenn die Flecken braun oder schwarz sind, wurde zu kurz gebleicht. -> Nochmal ins Bleichbad legen, wässern und trocknen.

Stellen sie sofern sie Zeit haben weitere Hologramme her. Verändern Sie aber, nachdem Sie ein gutes Hologramm erhalten haben, nichts mehr an Ihrem Aufbau oder der Art und Weise wie Sie belichten.



Aufgabe 6:

Beginnen Sie um : **Uhr** mit dem Abbau!

Hinweise zum Abbau:

- Schalten Sie die Laserdiode aus.
- Füllen Sie mit Hilfe des Trichters die Bäder in die entsprechenden Flaschen zurück. Achten Sie darauf, dass Sie die Flaschen nicht vertauschen und der Trichter nach jedem Bad mit Wasser ausgespült wird. Diese Bäder werden Sie nochmals benutzen.
- Waschen Sie die Becken und den Trichter mit Wasser ab und trocknen Sie sie mit Küchentuch. (Falls bei den Flaschen etwas daneben ging, diese bitte auch abwaschen und trocknen).
- Bauen Sie die Lampe ab, falten Sie sie zusammen und wickeln das Kabel darum, damit sie nicht wieder aufspringt.
- Stellen sie die Becken wieder zusammen und legen Sie die Materialien wieder hinein (siehe Versuchsmaterialien).
- Bringen Sie alle Versuchsmaterialien wieder nach vorne und legen Sie sie auf die dafür bestimmten Plätze.
- Wischen Sie falls nötig ihren Tisch ab.
- Benutztes Küchentuch sowie Handschuhe bitte wegwerfen.
- **Geben Sie Ihren Test ab!**



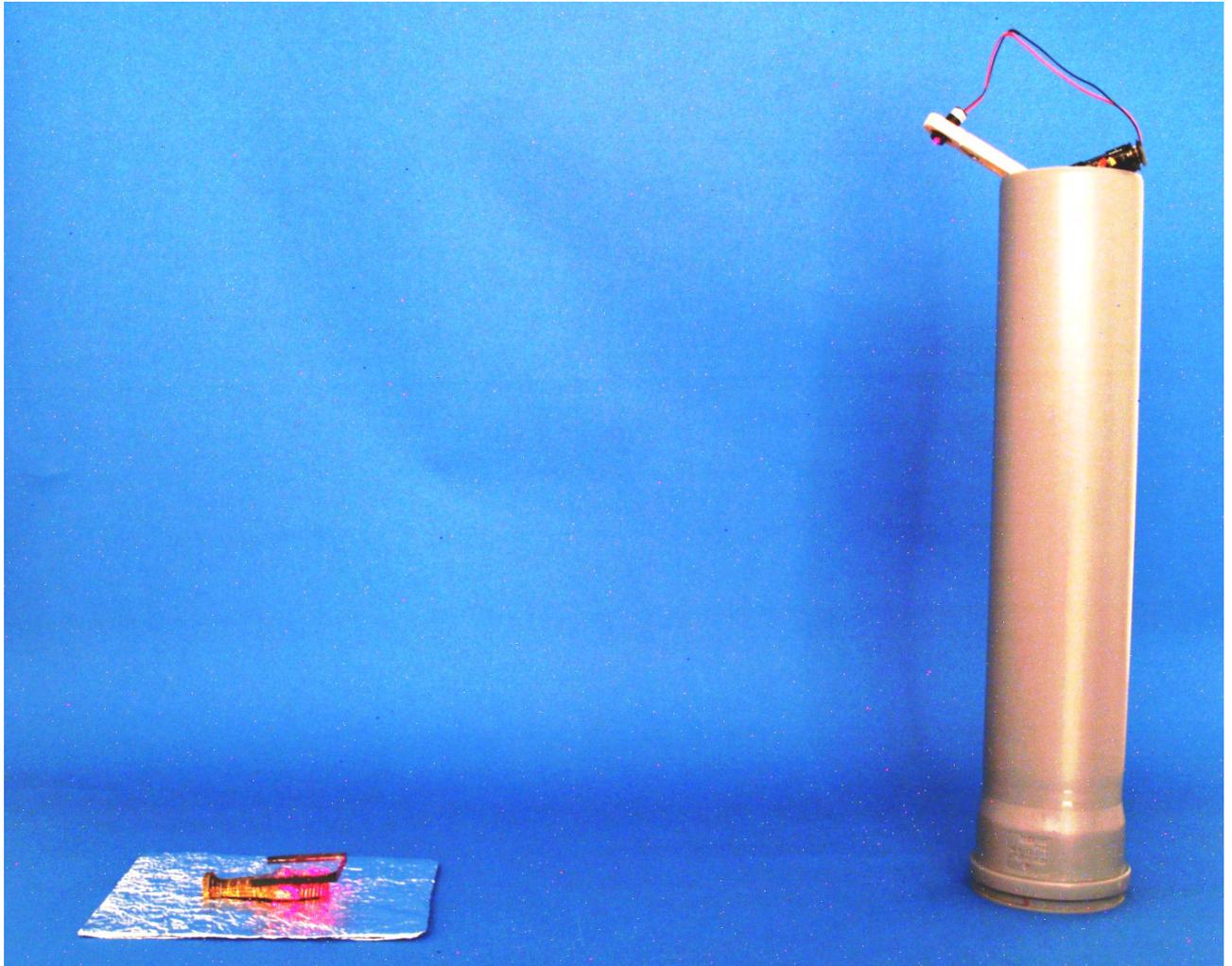
Zusatzaufgabe:

Im Nachbarraum liegt auf dem Tisch mit den Halogenlampen ein Hologramm, das mit einem Glasschneider durchgeschnitten wurde.

1. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten sie auf die Augen und die Gesichtshälften der Figur. Setzen Sie das Hologramm wieder zusammen und betrachten es wieder. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf?
2. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt. Vielleicht kann Ihnen dabei „Das Auto hinter der Glasscheibe“ weiterhelfen.

Musterlösung Grundkurs

Aufgabe 1:



Die Abbildung oben zeigt den Versuchsaufbau, mit dem Sie heute Hologramme belichten.

1. Wie Sie wissen, werden für die Aufnahme von Hologrammen verschiedene Wellen benötigt. Zeichnen Sie den Weg, den diese Wellen zurücklegen müssen, in das Bild des Aufbaus ein und beschriften Sie sie!
*Jeweils einen halben Pkt, auf Name und jew. einen halben Pkt auf eingezeichneten Weg **Gesamt: 2 Pkt***
2. Erläutern Sie kurz, wozu die verschiedenen Wellen nötig sind.
*Die **Form der Wellenfront** die gespeichert werden soll, ist abhän-*

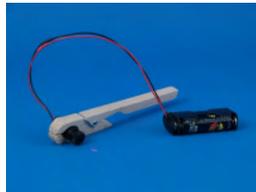
gig von der **Phase** und der **Amplitude** (1Pkt) der Elementarwellen. Phase und Amplitude können **gespeichert** werden, indem man die Wellenfront mit einer Vergleichs- oder **Referenzwelle überlagert** (1Pkt). Das entstehende **Interferenzmuster** (1Pkt) wird dann gespeichert. **Gesamt: 3Pkt**

3. Was hat der Photoeffekt mit der Belichtung der Holografieplatte zu tun?

In der Emulsion der Holografieplatte sitzen **Silberbromidkristalle** (1Pkt). Trifft bei der Belichtung ein Photon auf ein Silberbromidkristall, so kann das **Photon durch ein Elektron absorbiert** werden (1Pkt). Dieses Elektron hat nun genügend Energie um sich aus dem Verbund zu lösen. Dadurch **bricht eine der Verbindungen** zwischen einem Bromanion und einem Silberkation **auf** (1Pkt). Das nun freie Elektron wird von dem am nächstliegenden Silberanion wieder angezogen. Zusammen werden sie zu einem neutralen Silberatom, dass nun ungebunden im Kristall sitzt. D.h. das Kristallgitter dieser Kristalle wird stellenweise zerstört. **Gesamt: 3Pkt**

Aufgabe 2:

Sie arbeiten mit einer Laserdiode, die eine Leistung von 1mW besitzt.



1. Welche Verhaltensregel gilt im Umgang mit Lasern?
2. Welche Schutzmaßnahmen reichen bei der hierbenutzen Laserdiode aus?

2.1 und 2.2. zu einer Aufgabe zusammen genommen: nicht in den Laserstrahl schauen (1Pkt), Rücksicht auf andere, Schmuck ablegen, nur kontrolliert einsetzen, Lidschlussreflex (jeweils 0,5Pkt) **Gesamt: 3Pkt**

3. In welchem Bereich des Aufbaus ist der Laserstrahl am gefährlichsten? Bedenken Sie dabei, dass der Laserstrahl direkt an der Laserdiode aufgeweitet wird.

Direkt an der Laserdiode. **Gesamt: 1Pkt**

Aufgabe 4:

Der Hersteller der Platten gibt an, dass die Hologramme am schönsten werden, wenn sie eine Energie von $150 \mu\text{J}$ pro cm^2 erhalten.



1. Messen sie mit dem Photometer die Laserleistung an der Testplatte. Das Photometer gibt dabei die Leistung pro cm^2 an.
*Bsp: $150 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ **1Pkt** (nur der Wert 1/3 Pkt, Wert mit Einheit ohne cm^2 2/3 Pkt)*
2. Berechnen sie aus diesen Werten die optimale Belichtungszeit!
*Leistung / $\text{cm}^2 = \text{Energie} / (\text{cm}^2 * \text{Zeit}$*
*-> $\text{Zeit} = \text{Energie}/\text{Leistung} = \text{einsetzen (mit Einheiten!)} \text{ und ausrechnen} = \text{zwischen } 0,5 \text{ bis } 5 \text{ sec}$ 0,5 Pkt auf die Formel, 0,5 Pkt auf Rechnung, 0,5 Pkt auf Einheiten, 0,5 Pkt auf cm^2 **Gesamt: 2 Pkt***



Zusatzaufgabe:

Im Nachbarraum liegt auf dem Tisch auf dem die Halogenlampen stehen ein Hologramm das mit einem Glasschneider durchgeschnitten wurde.

1. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten sie auf die Augen und die Gesichtshälften der Figur. Setzen Sie das Hologramm wieder zusammen und betrachten es wieder. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf?
*Auf beiden Hälften sind die gleichen Teile eines Gegenstandes zu sehen (1Pkt)(wenn auch aus verschiedenen Blickwinkeln). Dies wäre bei einem Foto nicht möglich(0.5Pkt). **Gesamt: 1,5 Pkt***
2. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt. Vielleicht kann Ihnen dabei „Das Auto hinter der Glasscheibe“ weiterhelfen.
*Auf jedem Punkt der Holografieplatte wird jeder Punkt des Gegenstandes gespeichert. Wenn man die Hälfte abschneidet ist auf der anderen Hälfte immer noch jeder Punkt des Gegenstandes gespeichert. **Gesamt: 1,5Pkt***

Name:

Name des Gruppenpartners:

Aufgaben und Experimentieranleitung zur Holografie Teil 1

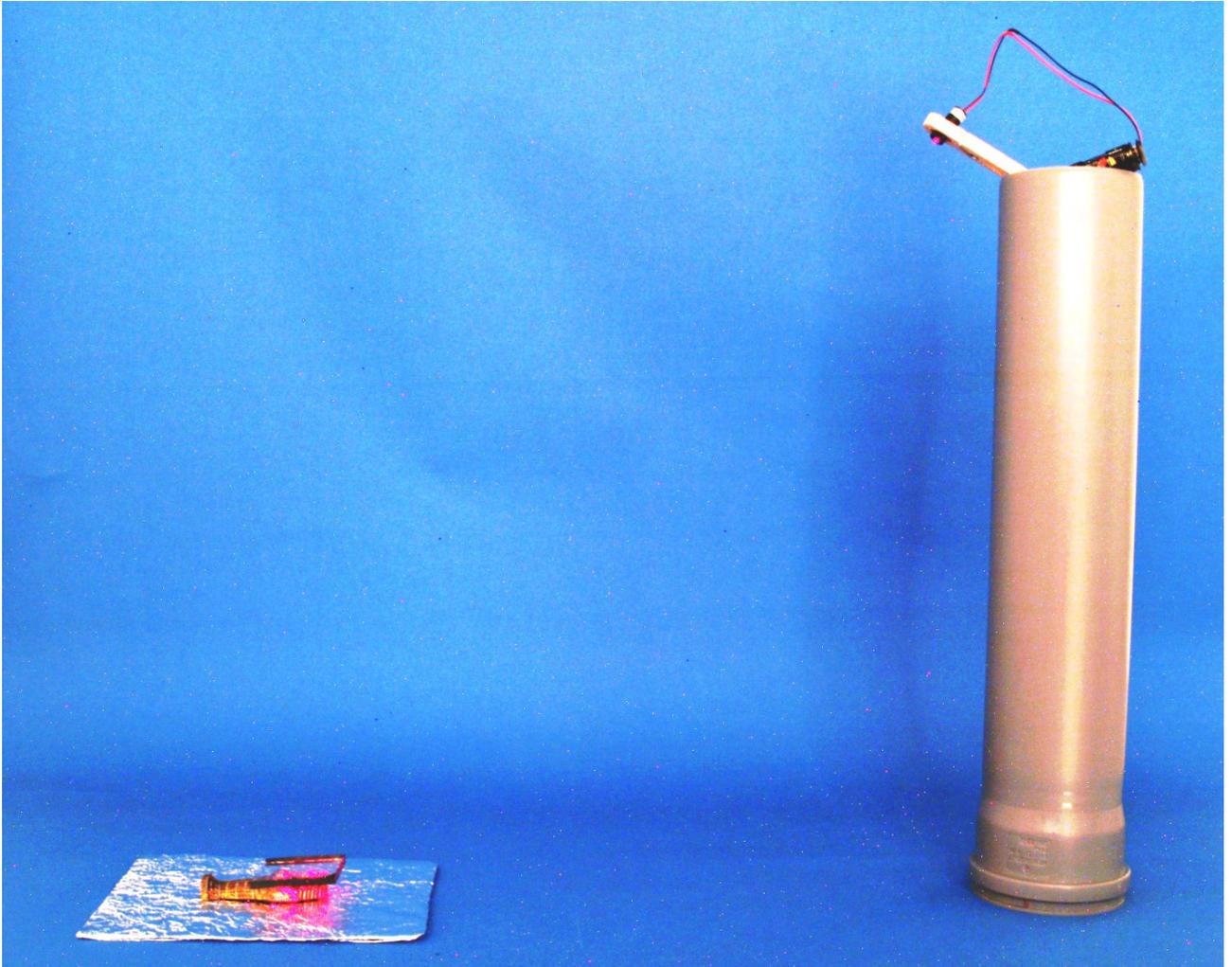
Wichtige Hinweise:

- Während des Versuches dürfen Sie das **Kapitel 4** des Skriptes nutzen.
- Die Symbole ,  stehen für praktische bzw. schriftliche Aufgaben.
- Ihre Antworten sollten nicht länger als 3 bis 4 Sätze sein.
- Achten Sie auf die Zeit!
- Für die **Beantwortung des Tests** und die **Abholung der Versuchsmaterialien** sind zusammen **15 min** vorgesehen - danach sollten sie mit den Versuchen beginnen und „Leerlaufzeiten“ nutzen, um eventuelle Lücken im Test zu vervollständigen.

Holen Sie sich pro Gruppe folgende Versuchsmaterialien:

- Rohr, gefüllt mit Sand
- 3 Plastikschaalen mit: Laserdiode, Batterien, Holzklammer, Testplatte, 3 Karteikarten, schwarze Knete im Handschuh, schwarze Tüte, Lampenhalterung, Holzblöcke um die Lampenhalterungen zu befestigen
- Mousepad mit Alufolie umwickelt
- 1 schwarze Pappe als „Strahlblocker“
- Entwicklungsbad, Stoppbad und Bleichbad
- 1 Rolle Zewa
- 1 Grünlichtlampe
- pro Person Kittel und Handschuhe
- 4 **Holografieplatten** (werden ausgeteilt) Bitte danach **direkt in die schwarze Tüte** legen, um sie vor Licht zu schützen!

 Aufgabe 1:



Die Abbildung oben zeigt den Versuchsaufbau, mit dem Sie heute Hologramme belichten.

1. Wie Sie wissen, werden für die Aufnahme von Hologrammen verschiedene Wellen benötigt. Zeichnen Sie den Weg, den diese Wellen zurücklegen müssen, in das Bild des Aufbaus ein und beschriften Sie sie!
2. Erläutern Sie wozu die verschiedenen Wellen nötig sind. (3-4 Sätze!)
3. Was hat der Photoeffekt mit der Belichtung der Holografieplatte zu tun? (3-4 Sätze!)



Aufgabe 2:

Sie arbeiten mit einer Laserdiode, die eine Leistung von 1mW besitzt.

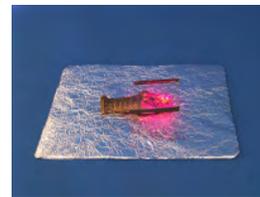
1. Nennen sie drei Verhaltensregeln im Umgang mit Lasern!
2. Welche Schutzmaßnahme sollten sie nutzen, wenn sie sich geblendet fühlen? (1 bis 2 Sätze!)
3. In welchem Bereich des Aufbaus ist der Laserstrahl am gefährlichsten? Bedenken Sie dabei, dass der Laserstrahl direkt an der Laserdiode aufgeweitet wird. (1 Satz!)



Aufgabe 3:

Nehmen Sie den Aufbau in Betrieb! Führen Sie dazu nacheinander folgende Schritte aus.

Achtung: Laser!



- Legen Sie Ihren Schmuck ab (Uhren, Ringe, Ketten...). Er könnte den Laserstrahl unkontrolliert reflektieren.
- Stecken Sie die Holzklammer in das mit Sand gefüllte Rohr und klemmen sie die Laserdiode darin ein. (Laserdiode noch nicht mit den Batterien verbinden, um unkontrolliertes Herumschießen zu vermeiden.)
- Legen Sie in ca. 1m Entfernung zum Rohr ihren Gegenstand auf das mit Alufolie umwickelte Mousepad und eine Testplatte darauf. Bei Bedarf können Sie die Knete zum justieren des Gegenstandes nutzen.
- Verbinden Sie die Batterien mit der Laserdiode.
- **Leuchten Sie den Gegenstand und die Testplatte vollständig und gleichmäßig aus.** Im Gehäuse der Laserdiode befindet sich eine

Linse. Durch Drehen des Aufsatzes kann deren Position verändert werden. Der „Strahl“ einer Laserdiode ist immer elliptisch, drehen sie die ganze Diode, um dies auszugleichen.



Aufgabe 4:

Der Hersteller der Platten gibt an, dass die Hologramme am schönsten werden, wenn sie eine Energie von $150 \mu\text{J}$ pro cm^2 erhalten.



1. Messen Sie mit dem Photometer die Laserleistung an der Testplatte (siehe Kap. 4). Das Photometer gibt dabei die Leistung pro cm^2 an. Geben Sie Ihren Messwert an!
(Achten Sie beim Ablesen darauf, dass der angezeigte Wert nicht mit dem Messbereich verrechnet werden muss, im Gegensatz zu Messgeräten mit Zeigern. Sie müssen lediglich die Zahl ablesen und die Einheit des Messbereichs übernehmen. Bsp.: Sie messen im 2mW Bereich, das Gerät zeigt 1,3 an, das sind dann 1,3mW pro cm^2 .)
2. Berechnen Sie aus diesen Werten die optimale Belichtungszeit!



Aufgabe 5:

Nehmen Sie ein Hologramm auf und entwickeln Sie es! Beachten Sie, dass dazu die Antwort der Aufgabe 4 nötig ist. Nehmen Sie sich das Kapitel 4 und das Troubleshooting (unten) zur Hilfe!

Troubleshooting:

- **Es ist gar kein Hologramm zu sehen:** wahrscheinlich hat sich der Aufbau bewegt.
- **Ein Hologramm ist da, aber viel zu schwach:** wahrscheinlich unterbelichtet - das nächste mal etwas länger belichten.

- **Hologramm ist da, aber an einer Stelle ist nichts zu sehen:**
 - a) Es könnte „verbrannt“ sein, diese Stelle hat zuviel Energie erhalten! Kürzer belichten oder die Platte gleichmäßiger ausleuchten.
 - b) Es könnte nicht ganz ausgeleuchtet gewesen sein. Nächstes mal vollständig ausleuchten!
- **Hologramm hat Flecken:** Wenn die Flecken grün oder gelb sind, wurde nicht genügend gewässert. -> Nochmals wässern und trocknen. Wenn die Flecken braun oder schwarz sind, wurde zu kurz gebleicht. -> Nochmal ins Bleichbad legen, wässern und trocknen.

Stellen Sie sofern Sie Zeit haben weitere Hologramme her. Verändern Sie aber nachdem Sie ein gutes Hologramm erhalten haben, nichts mehr an Ihrem Aufbau oder der Art und Weise wie Sie belichten. **Falls Sie dies doch tun, müssen Sie bei jeder Veränderung des Aufbaus die Belichtungszeit neu berechnen!** (Dies muss dann aber nicht protokolliert werden.)



Aufgabe 6:

Beginnen Sie um : **Uhr** mit dem Abbau!

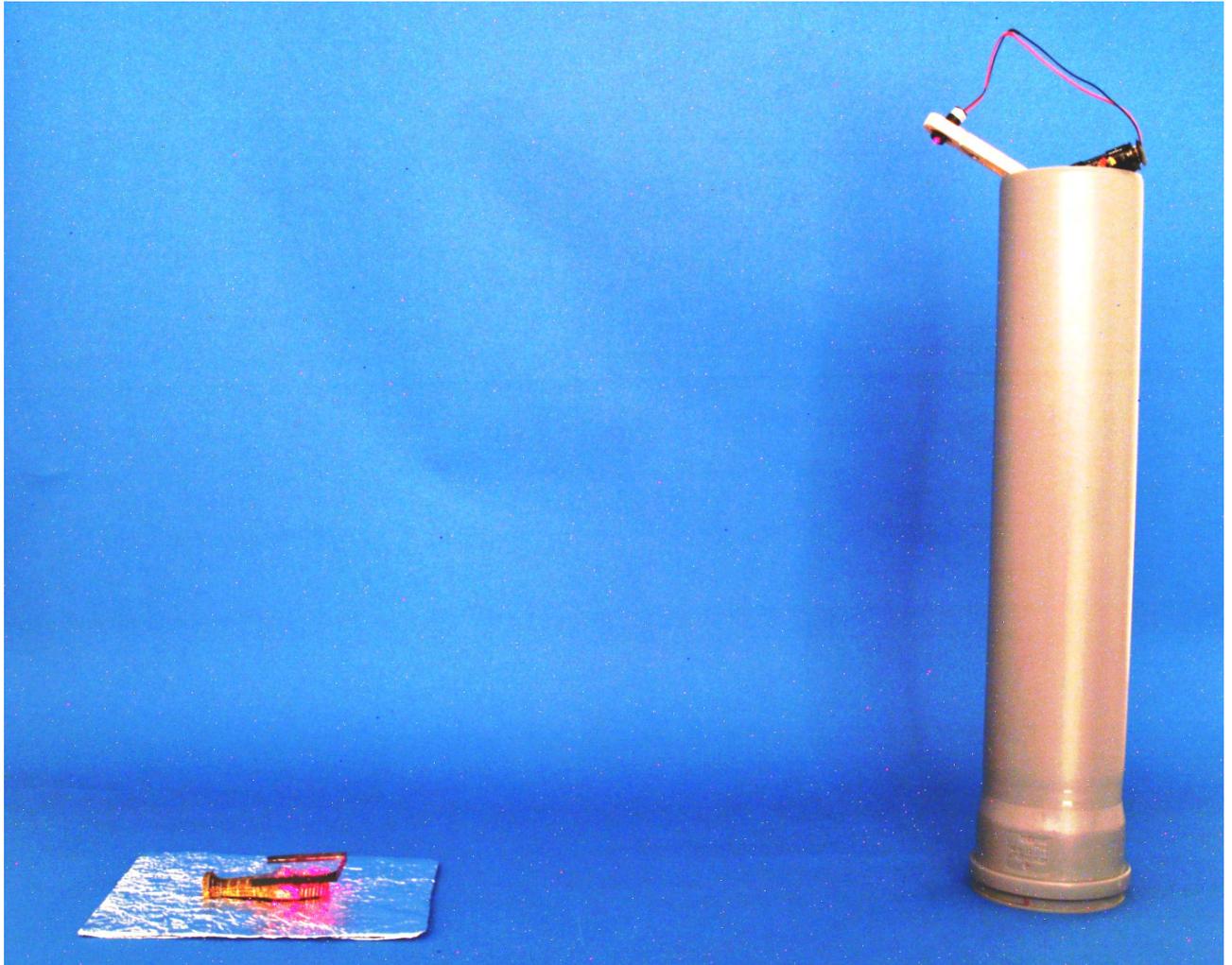
Hinweise zum Abbau:

- Schalten Sie die Laserdiode aus.
- Füllen Sie mit Hilfe des Trichters die Bäder in die entsprechenden Flaschen zurück. Achten Sie darauf, dass Sie die Flaschen nicht vertauschen und der Trichter nach jedem Bad mit Wasser ausgespült wird. Diese Bäder werden Sie nochmals benutzen.
- Waschen Sie die Becken und den Trichter mit Wasser ab und trocknen Sie sie mit Zewa. (Falls bei den Flaschen was daneben ging, diese bitte auch abwaschen und trocknen).
- Bauen Sie die Lampe ab.
- Stellen sie die Becken wieder zusammen und legen Sie die Materialien wieder hinein (siehe Versuchsmaterialien).
- Bringen Sie alle Versuchsmaterialien wieder nach vorne und legen Sie sie auf die dafür bestimmten Plätze.
- Wischen Sie falls nötig ihren Tisch ab.
- Benutztes Küchentuch sowie Handschuhe bitte wegwerfen.
- **Geben Sie Ihren Test ab!**

Musterlösung Leistungskurs

Aufgaben und Experimentieranleitung zur Holografie Teil 1

Aufgabe 1:



Die Abbildung oben zeigt den Versuchsaufbau, mit dem Sie heute Hologramme belichten.

1. Wie Sie wissen, werden für die Aufnahme von Hologrammen verschiedene Wellen benötigt. Zeichnen Sie den Weg den diese Wellen zurücklegen müssen in das Bild des Aufbaus ein und beschriften Sie sie!
*Jeweils einen halben Pkt, auf Name und jew. einen halben Pkt auf eingezeichneten Weg **Gesamt: 2 Pkt***

2. Erläutern Sie kurz wozu die verschiedenen Wellen nötig sind.
*Die **Form der Wellenfront** die gespeichert werden soll, ist abhängig von der **Phase** und der **Amplitude** (1Pkt) der Elementarwellen. Phase und Amplitude können **gespeichert** werden, indem man die Wellenfront mit einer Vergleichs- oder **Referenzwelle überlagert** (1Pkt). Das entstehende **Interferenzmuster** (1Pkt) wird dann gespeichert. **Gesamt: 3Pkt***

3. Was hat der Photoeffekt mit der Belichtung der Holografieplatte zu tun?
*In der Emulsion der Holografieplatte sitzen **Silberbromidkristalle** (1Pkt). Trifft bei der Belichtung ein Photon auf ein Silberbromidkristall, so kann das **Photon durch ein Elektron absorbiert** werden (1Pkt). Dieses Elektron hat nun genügend Energie um sich aus dem Verbund zu lösen. Dadurch **bricht eine der Verbindungen** zwischen einem Bromanion und einem Silberkation **auf** (1Pkt). Das nun freie Elektron wird von dem am nächstliegenden Silberanion wieder angezogen. Zusammen werden sie zu einem neutralen Silberatom, dass nun ungebunden im Kristall sitzt. D.h. das Kristallgitter dieser Kristalle wird stellenweise zerstört. **Gesamt: 3Pkt***

Aufgabe 2:

Sie arbeiten mit einer Laserdiode die eine Leistung von 1mW besitzt.

1. Nennen sie drei Verhaltensregeln im Umgang mit Lasern!
*nicht in den Laserstrahl schauen, Rücksicht auf andere, Schmuck ablegen, nur kontrolliert einsetzen ... je richtiger Antwort 1 Pkt **Gesamt: 3Pkt***

2. Welche Schutzmaßnahme sollten sie nutzen, wenn sie sich geblendet fühlen? (1 bis 2 Sätze!)
*Sofern man sich geblendet fühlt, die **Augen geschlossen** halten sobald der **Lidschlussreflex** sie geschlossen hat (1Pkt) und den **Kopf aus der Gefahrenzone** (1Pkt) bewegen. **Gesamt: 2 Pkt***

3. In welchem Bereich des Aufbaus, ist der Laserstrahl am gefährlichsten? Bedenken Sie dabei, dass der Laserstrahl direkt an der Laserdiode aufgeweitet wird. (1 Satz!) *Direkt an der Laserdiode. **Gesamt: 1Pkt***

Aufgabe 4:

Der Hersteller der Platten gibt an, dass die Hologramme am schönsten werden, wenn sie eine Energie von $150 \mu\text{J}$ pro cm^2 erhalten.



1. Messen sie mit dem Photometer die Laserleistung an der Testplatte. Das Photometer gibt dabei die Leistung pro cm^2 an.
Bsp: $150 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ 1Pkt (nur der Wert 1/3 Pkt, Wert mit Einheit ohne cm^2 2/3 Pkt)
2. Berechnen sie aus diesen Werten die optimale Belichtungszeit!
*Leistung / $\text{cm}^2 = \text{Energie} / (\text{cm}^2 * \text{Zeit}$*
-> Zeit = Energie/Leistung = einsetzen (mit Einheiten!) und ausrechnen = zwischen 0,5 bis 5 sec 0,5 Pkt auf die Formel, 0,5 Pkt auf Rechnung, 0,5 Pkt auf Einheiten, 0,5 Pkt auf cm^2 Gesamt: 2 Pkt



Zusatzaufgabe: (Bei dieser Aufgabe können sie Extrapunkte bekommen.)

Im Nachbarraum liegt auf dem Tisch auf dem die Halogenlampen stehen ein Hologramm das mit einem Glasschneider durchgeschnitten wurde.

1. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten sie auf die Augen und die Gesichtshälften der Figur. Setzen Sie das Hologramm wieder zusammen und betrachten es wieder. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf?
Die gleichen Teile eines Gegenstandes sind auf beiden Hälften zu sehen, dies wäre bei einem Foto nicht möglich. 1,5 Pkt
2. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt. Vielleicht kann Ihnen dabei „Das Auto hinter der Glasscheibe“ weiterhelfen.
Auf jedem Punkt der Holografieplatte wird jeder Punkt des Gegenstandes gespeichert. Wenn man die Hälfte abschneidet ist auf der anderen Hälfte immer noch jeder Punkt des Gegenstandes gespeichert. 1,5Pkt

Name:

Name des Gruppenpartners:

Aufgaben und Experimentieranleitung zur Holografie Teil 2

Wichtige Hinweise:

- **Von den Aufgaben 2, 3 und 4 müssen und dürfen(!) nur zwei bearbeitet werden. Suchen sie sich zwei aus!**
- Während des Versuches dürfen Sie das **Kapitel 4** des Skriptes nutzen.
- Die Symbole ,  stehen für praktische bzw. schriftliche Aufgaben.
- Ihre Antworten sollten nicht länger als 3 bis 4 Sätze sein.

Holen Sie sich pro Gruppe folgende Versuchsmaterialien:

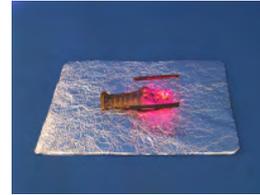
- Muffe und Messingstange
- Rohr, gefüllt mit Sand
- 3 Plastikschaalen, mit: Laserdiode, Batterien, Holzklammer, Testplatte, 3 Karteikarten, schwarze Knete im Handschuh, schwarze Tüte, Lampenhalterung, Holzblöcke um die Lampenhalterungen zu befestigen
- Mousepad mit Alufolie umwickelt
- 1 schwarze Pappe als „Strahlblocker“
- Entwicklungsbad, Stoppbad und Bleichbad
- 1 Rolle Zewa
- 1 Grünlichtlampe
- pro Person Kittel und Handschuhe
- 4 **Holografieplatten** (werden ausgeteilt) bitte danach **direkt in die schwarze Tüte** legen!



Aufgabe 1:

Nehmen Sie den Aufbau wie gewohnt in Betrieb! Führen Sie dazu nacheinander folgende Schritte aus.

Achtung: Laser!



Legen Sie Ihren Schmuck ab (Uhren, Ringe, Ketten...). Er könnte den Laserstrahl unkontrolliert reflektieren.

- Stecken Sie die Holzklammer in das mit Sand gefüllte Rohr und klemmen sie die Laserdiode darin ein. (Laserdiode noch nicht mit den Batterien verbinden - um unkontrolliertes herumschießen zu vermeiden.)
- Legen Sie in ca. 1m Entfernung zum Rohr ihren Gegenstand auf das mit Alufolie umwickelte Mousepad und eine Testplatte darauf. Bei Bedarf können Sie die Knete zum justieren des Gegenstandes nutzen.
- Verbinden Sie die Batterien mit der Laserdiode.
- **Leuchten Sie den Gegenstand und die Testplatte vollständig und gleichmäßig aus.** Im Gehäuse der Laserdiode befindet sich eine Linse. Durch Drehen des Aufsatzes kann deren Position verändert werden. Der „Strahl“ einer Laserdiode ist immer elliptisch, drehen sie die ganze Diode, um dies auszugleichen.



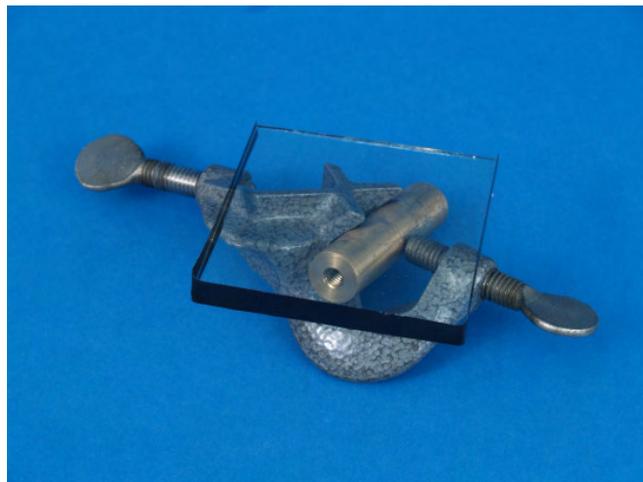
AUFGABE 2:

1. Stellen Sie ein gutes Hologramm (Gegenstand muss gut sichtbar sein) her und schneiden Sie es mit einem Glasschneider durch (**Anleitung** Kapitel 4 **beachten!**).
2. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten Sie auf die Schnittstelle des Hologrammes. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf?
(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts gesehen haben, lassen Sie sich von mir ein anderes geschnittenes Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)
3. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt.



AUFGABE 3:

Infotext: Hologramme können mehrere Bilder speichern. Schaut man sich das Hologramm später an, so sieht man alle gespeicherten Bilder gleichzeitig. (Die Bilder sind sozusagen überlagert.) Dies wird zu verschiedenen Zwecken (unter anderem zu interferometrischen Aufnahmen) genutzt.



1. Nehmen Sie ein interferometrisches Hologramm auf!
 - Nehmen Sie sich als Objekt eine Muffe und eine Messingstange, fixieren Sie die Messingstange in der Muffe. Achten sie darauf,

dass sie die Schraube zwar anziehen, aber noch nicht ganz festziehen.

- Belichten Sie das Objekt mit der Hälfte der Belichtungszeit.
 - Ziehen Sie **ohne die Platte und die Muffe zu bewegen(!)** die Schraube der Muffe einwenig weiter an.
 - Belichten Sie die Holografieplatte erneut mit der Hälfte der Belichtungszeit.
 - Entwickeln Sie das Hologramm wie gewohnt.
2. Betrachten Sie ihr Hologramm im Licht ihrer Laserdiode.  **Vorsicht vor den Reflektionen!** Was fällt Ihnen bei dem Hologramm auf? Achten Sie auf die Messingstange!
(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts entdeckt haben, lassen Sie sich von mir ein anderes Interferometrisches Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)
3. Wie kommt diese Veränderung zustande? Der Infotext oben in der Aufgabe, kann Ihnen bei der Beantwortung der Frage helfen, ist aber natürlich noch nicht die Antwort.



AUFGABE 4:

1. Hauchen (nicht pusten!) Sie eine Holografieplatte vor dem Belichten mindestens 2 min an (wechseln Sie sich dabei ab, damit Ihnen nicht schwindelig wird). Nehmen Sie wie gewohnt das Hologramm auf und entwickeln Sie es! (Infotext: Beim Anhauchen quillt die Emulsionsschicht auf. Nach ca. 5 min ist Sie wieder auf Normaldicke geschrumpft.)
2. Vergleichen Sie dieses Hologramms mit einem, das Sie zuvor oder gestern aufgenommen haben!
(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts entdeckt haben, lassen Sie sich von mir ein anderes Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)
3. Erläutern Sie mit Hilfe der Bragg Bedingung und dem Infotext, wie der Unterschied des angehauchten Hologrammes zu einem nicht angehauchten entsteht! (Setzen sie dabei voraus, dass der Betrachtungswinkel bei den beiden Hologrammen der Gleiche ist. Und bedenken Sie, dass unsere Hologramme immer im ersten Hauptmaximum gesehen werden.)



Aufgabe 5:

Beginnen Sie um : Uhr mit dem Abbau!

Hinweise zum Abbau:

- Schalten Sie die Laserdiode aus.
- **Füllen Sie das Entwicklungsbad (nicht das Stoppbad und das Bleichbad!) in die dafür vorgesehenen Entsorgungskanister.**
- Füllen Sie mit Hilfe des Trichters das Stoppbad und das Bleichbad in die entsprechenden Flaschen zurück. Achten Sie darauf, dass Sie die Flaschen nicht vertauschen und der Trichter nach jedem Bad mit Wasser ausgespült wird. Diese Bäder werden nochmals benutzt.
- Waschen Sie die Becken und den Trichter mit Wasser ab und trocknen Sie sie mit Küchentuch. (Falls bei den Flaschen etwas daneben ging, diese bitte auch abwaschen und trocknen.
- Bauen Sie die Lampe ab.
- Stellen Sie die Becken wieder zusammen und legen Sie die Materialien wieder hinein (siehe Versuchsmaterialien).
- Bringen Sie alle Versuchsmaterialien wieder nach vorne und legen Sie sie auf die dafür bestimmten Plätze.
- Wischen Sie falls nötig ihren Tisch ab.
- Benutztes Küchentuch sowie Handschuhe bitte wegwerfen.
- **Geben Sie Ihren Test ab!**

Musterlösung

Aufgaben und Experimentieranleitung zur Holografie Teil 2

AUFGABE 2:

1. Stellen Sie ein gutes Hologramm (Gegenstand muss gut sichtbar sein) her und schneiden Sie es mit einem Glasschneider durch (**Anleitung** Kapitel 4 **beachten!**).
2. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten Sie auf die Schnittstelle des Hologrammes. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf?
(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts gesehen haben, lassen Sie sich von mir ein anderes geschnittenes Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)
Auf beiden Hologrammhälften sind dieselben Details (z.B. beide Augen) zu sehen, dies wäre bei einem Foto nicht möglich. (1 Pkt)
3. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt!
*Wie auch bei dem „Auto hinter der Glasscheibe“ trifft auf jedem Punkt der Holografieplatte jeder Punkt des Gegenstandes. Dadurch wird bei der Belichtung die Information jedes Objektpunktes auf jedem Punkt der Platte gespeichert(1Pkt). Wenn man die Holografieplatte durchschneidet, ist beiden Hälften immer noch jeder Punkt des Gegenstandes gespeichert (1Pkt), man kann also auf beiden Hälften alle Objektpunkte (nur eben aus verschiedenen Blickrichtungen) sehen (1Pkt).
(Gesamt: 3Pkt)*

AUFGABE 3:

Infotext: Hologramme können mehrere Bilder speichern. Schaut man sich das Hologramm später an, so sieht man alle gespeicherten Bilder gleichzeitig. (Die Bilder sind sozusagen überlagert.) Dies wird zu verschiedenen Zwecken (unter anderem zu interferometrischen Aufnahmen) genutzt.



1. Nehmen Sie ein interferometrisches Hologramm auf!
2. Betrachten Sie ihr Hologramm im Licht ihrer Laserdiode.  **Vorsicht vor den Reflektionen!** Was fällt Ihnen bei dem Hologramm auf? Achten Sie auf die Messingstange!
(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts entdeckt haben, lassen Sie sich von mir ein anderes Interferometrisches Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)

Auf der Messingstange sind schwarze Streifen zu sehen (1Pkt)

3. Wie kommt diese Veränderung zustande? Der Infotext oben in der Aufgabe, kann Ihnen bei der Beantwortung der Frage helfen, ist aber natürlich noch nicht die Antwort.

Interferometrische Hologramme reproduzieren alle gespeicherten Bilder gleichzeitig. Diese Interferieren miteinander (1Pkt). An Stellen an denen sich das Objekt so verschoben hat, dass Berg auf Tal bzw. Tal auf Berg trifft entstehen Interferenzminima (1Pkt), d.h. schwarze Streifen(1Pkt). (Gesamt: 3 Pkt)

AUFGABE 4:

1. Hauchen (nicht pusten!) Sie eine Holografieplatte vor dem Belichten mindestens 2 min an. Nehmen Sie wie gewohnt das Hologramm auf und entwickeln Sie es! (Infotext: Beim Anhauchen quillt die Emulsionsschicht auf. Nach ca. 5 min ist Sie wieder auf Normaldicke geschrumpft.)

2. Vergleichen Sie dieses Hologramms mit einem, das Sie früher aufgenommen haben!

(Falls Sie nach ausführlicher Betrachtung (ca. 2 min) immer noch nichts entdeckt haben lassen Sie sich von mir ein anderes Hologramm geben, auf dem man den Effekt auf jeden Fall sieht.)

Hologramm erscheint in grün (blau oder violett ebenfalls möglich), sonst sind sie rot. (1 Punkt)

3. Erläutern Sie mit Hilfe der Bragg Bedingung und dem Infotext, wie der Unterschied des angehauchten Hologrammes zu einem nicht angehauchten entsteht! (Setzen sie dabei voraus, dass der Betrachtungswinkel bei den beiden Hologrammen der Gleiche ist. Und bedenken Sie, dass unsere Hologramme immer im ersten Hauptmaximum gesehen werden.)

*Beim Anhauchen quillt die Emulsionsschicht auf und damit werden die Abstände der Interferenzstreifen in der Platte ebenfalls größer (1Pkt). Nach der Belichtung schrumpft die Schicht dann wieder zusammen, d.h. die Abstände d werden kleiner (1 Pkt). Da nach Bragg $\lambda = d \cdot \sin(\alpha)$ gilt, bedeutet eine Verkleinerung von d bei konstantem Winkel α eine Verkleinerung der reflektierten Wellenlänge λ , das Hologramm erscheint in grün (blau oder violett) (1 Pkt) (**Gesamt: 3 Pkt**)*

Test zur Holografie Teil 2

Name:

Name des Gruppenpartners:

AUFGABE 1:

An einer der Stationen liegt ein durchgeschnittenes Hologramm.

1. Betrachten Sie die beiden Hälften sehr genau. Achten Sie auf die Schnittstelle des Hologrammes. Was fällt Ihnen im Unterschied zu einem durchgeschnittenen Foto auf? (1 Satz)
2. Erklären Sie wie dieser Effekt zustande kommt. (2-3 Sätze)

AUFGABE 2:

Infotext: Hologramme können mehrere Bilder speichern. Schaut man sich das Hologramm später an, so sieht man alle gespeicherten Bilder gleichzeitig. (Die Bilder sind sozusagen überlagert.) Dies wird zu verschiedenen Zwecken (unter anderem zu Interferometrischen Aufnahmen) genutzt.

1. Betrachten Sie das interferometrische Hologramm einer Messingstange, die in einer Muffe eingespannt ist, im Licht einer Laserdiode.  **Vorsicht vor den Reflektionen!** Bei dieser Aufnahme wurde das Hologramm doppelt belichtet. Bei der einen Aufnahme war die Messingstange in der Muffe nur fixiert, beim zweiten mal wurde die Schraube der Muffe fest angezogen. Was fällt Ihnen bei dem Hologramm auf? Achten Sie auf die Messing-

stange! (1 Satz)



2. Wie kommt diese Veränderung zustande? Der Infotext oben in der Aufgabe, kann Ihnen bei der Beantwortung der Frage helfen, ist aber natürlich noch nicht die komplette Antwort. (2-3 Sätze)



ZUSATZAUFGABE: (Bei dieser Aufgabe können sie Extrapunkte bekommen!)

Werden Hologramme vor der Belichtung angehaucht, verändern sie sich. Infotext: Beim Anhauchen quillt die Emulsionsschicht auf. Nach ca. 5 min ist Sie wieder auf Normaldicke geschrumpft.

1. Vergleichen Sie ein vor der Belichtung angehauchtes Hologramms mit einem nicht angehauchten. Was fällt Ihnen auf? (1 Satz)
2. Erläutern Sie mit Hilfe der Bragg Bedingung und dem Infotext wie der Unterschied des angehauchten Hologrammes zu einem nicht angehauchten entsteht! (Setzen sie dabei vorraus, dass der Betrachtungswinkel bei den beiden Hologrammen der Gleiche ist. Und bedenken Sie, dass unsere Hologramme immer im ersten Hauptmaximum gesehen werden.) (2-3 Sätze)

Datum:

Kurs:

Bewertungsbogen

- **Durchführung**

motorische Fähigkeiten:

D1) Aufbau der Experimentieranordnung, D2) Sachgerechte Nutzung der Experimentieranordnung, D3) Abbau und Säuberung der Experimentieranordnung

Herangehensweise:

D4) Einhaltung der Zeitvorgabe, D5) Überblick über das Material (2 Photometer und 2 Stationen zu den geschnittenen Hologrammen müssen von 6 Gruppen geteilt werden), D6) Sicherheit(Schutzkleidung, Schmuck)

Name	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Bemerkungen zur D.	sonstiges

Tabelle A.6: Bewertungstabelle

- **Teamarbeit**

innerhalb der Gruppen:

T1) Aufgabenteilung, T2) effizientes Arbeiten, T3) gemeinsame Problemdiskussion, T4) gemeinsame Problemlösung

innerhalb des Kurses:

T5) Verantwortung den anderen gegenüber (Umgang mit dem Laser, den Chemikalien, der Türschleuse), T6) Absprachen mit anderen Gruppen (Benutzung von Photometer und der Station zu den geschnittenen Hologrammen)

Name	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bemerkungen zur Teamarbeit

Tabelle A.7: Bewertungstabelle

A.2.3 Anwendungen der Holografie

- Personalausweis
- Unser Geld
- Holografie in Wissenschaft und Technik
- Digitale holografische Gesichtsvermessung
- Holografie in der Werbeindustrie

Personalausweis:

Sicherheitsmerkmale

http://www.bundesdruckerei.de/de/iddok/2_1/2_1_6.html

Unser Geld:

Fälschungsschutz

http://www.bundesbank.de/bildung/bildung_sekundarstufe1.php

Holografie in Wissenschaft und Technik:

Verschiedene Anwendungsgebiete u.a. Interferometrie und Datenspeicher

<http://www.pro-physik.de/Phy/pjtoc.do?issue=17523&mid=3>

Digitale holografische Gesichtsvermessung:

Anwendung der Holografie in der Medizin

<http://www.caesar.de/holographyandlaser.0.html>

HoloPro und HoloSign:

Holografie in der Werbeindustrie

<http://www.holopro.com/index.php?id=172>

A.3 Ergebnisse der Unterrichtsreihe

- Bewertungsbogen des Grundkurses
- Bewertungsbogen des Leistungskurses Teil 1
- Bewertungsbogen des Leistungskurses Teil 2
- Notenverteilung des Leistungskurses

Datum: 6. November 2006

Kurs: Grundkurs

Bewertungsbogen

- **Durchführung**

motorische Fähigkeiten:

D1) Aufbau der Experimentieranordnung, D2) Sachgerechte Nutzung der Experimentieranordnung, D3) Abbau und Säuberung der Experimentieranordnung

Herangehensweise:

D4) Einhaltung der Zeitvorgabe, D5) Überblick über das Material (2 Photometer und 2 Stationen zu den geschnittenen Hologrammen müssen von 6 Gruppen geteilt werden), D6) Sicherheit (Schutzkleidung, Schmuck)

Name	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Bemerkungen zur D.	sonstiges
Schüler 1								
Schüler 2								
Schüler 3			(+)					
Schüler 4							(-) Kap. 4 nicht gelesen	
Schüler 5								
Schüler 6	(+)							
Schüler 7								
Schüler 8								
Schüler 9			(+)					
Schüler 10								
Schüler 11								
Schüler 12		(+)					(+) fragen bei Unklarheiten nach; S. 13 macht andere	
Schüler 13			(+)			(+)	Schüler auf Kittel und Handschuhe aufmerksam	

Tabelle A.8: Bewertungstabelle

- **Teamarbeit**

innerhalb der Gruppen:

T1) Aufgabenteilung, T2) effizientes Arbeiten, T3) gemeinsame Problemdiskussion, T4) gemeinsame Problemlösung

innerhalb des Kurses:

T5) Verantwortung den anderen gegenüber (Umgang mit dem Laser, den Chemikalien, der Türschleuse), T6) Absprachen mit anderen Gruppen (Benutzung von Photometer und der Station zu den geschnittenen Hologrammen)

Name	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bemerkungen zur Teamarbeit
Schüler 1							
Schüler 2							
Schüler 2							
Schüler 4	(+)						(+) achten auf die Schleuse
Schüler 5							
Schüler 6							
Schüler 7							
Schüler 8							
Schüler 9							
Schüler 11							
Schüler 12							
Schüler 13							(-) schwenken die H.-Platten nicht (-) wissen nicht auf welcher
Schüler 14						(+)	Seite die H.-Platte liegt

Tabelle A.9: Bewertungstabelle

Schüler 4 nutzt das ganze Schülerskript zur Beantwortung der Fragen

Datum:14. November 2006

Kurs: Leistungskurs

Bewertungsbogen 1

- **Durchführung**

motorische Fähigkeiten:

D1) Aufbau der Experimentieranordnung, D2) Sachgerechte Nutzung der Experimentieranordnung, D3) Abbau und Säuberung der Experimentieranordnung

Herangehensweise:

D4) Einhaltung der Zeitvorgabe, D5) Überblick über das Material (2 Photometer und 2 Stationen zu den geschnittenen Hologrammen müssen von 6 Gruppen geteilt werden), D6) Sicherheit(Schutzkleidung, Schmuck)

Name	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Bemerkungen zur D.	sonstiges
Schüler 1	(+)	(-)					holen sehr schnell das Material; arbeiten	sehr gute Zeiteinteilung
Schüler 2		(+)		(+)			sehr konzentriert;	
Schüler 3							schwenken nicht immer die H.Platten	
Schüler 4		(+) (-)	(+)				(+) S.4 erklärt S.5 Details zum Aufbau	
Schüler 5								
Schüler 6	(-)	(+)					brauchen extrem lang zum Material holen;	schreiben erst den Test
Schüler 7							Objekt und Platte optimal ausgeleuchtet	
Schüler 8	(-)	(-)	(+)		(-)	(+)	brauchen extrem lang zum Material holen;	haben das Skript nicht gelesen und
Schüler 9							Abstand Rohr und Objekt ca. 30 cm; schwenken nicht immer; sehr guter Umgang mit Türschleuse	lesen es auch nicht bei wiederholter Aufforderung; fragen nach dem Sinn der Alufolie und (+) probieren es ohne

Tabelle A.10: Bewertungstabelle

- **Teamarbeit**

innerhalb der Gruppen:

T1) Aufgabenteilung, T2) effizientes Arbeiten, T3) gemeinsame Problemdiskussion, T4) gemeinsame Problemlösung

innerhalb des Kurses:

T5) Verantwortung den anderen gegenüber (Umgang mit dem Laser, den Chemikalien, der Türschleuse), T6) Absprachen mit anderen Gruppen (Benutzung von Photometer und der Station zu den geschnittenen Hologrammen)

Name	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bemerkungen zur Teamarbeit
Schüler 1		(+)	(+)				S.1 übernimmt Gruppenleitung verteilt Aufgaben und behält den Überblick
Schüler 2			(+)				
Schüler 3							
Schüler 4							
Schüler 5							
Schüler 6			(+)				S. 7 möchte zunächst nicht mit S. 6 zusammen arbeiten es geht später aber doch gut
Schüler 7							
Schüler 8							
Schüler 9							

Tabelle A.11: Bewertungstabelle

Datum: 15. November 2006

Kurs: Leistungskurs

Bewertungsbogen 2

• Durchführung

motorische Fähigkeiten:

D1) Aufbau der Experimentieranordnung, D2) Sachgerechte Nutzung der Experimentieranordnung, D3) Abbau und Säuberung der Experimentieranordnung

Herangehensweise:

D4) Einhaltung der Zeitvorgabe, D5) Überblick über das Material (2 Photometer und 2 Stationen zu den geschnittenen Hologrammen müssen von 6 Gruppen geteilt werden), D6) Sicherheit (Schutzkleidung, Schmuck)

Name	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Bemerkungen zur D.	sonstiges
Schüler 8								
Schüler 6	(+)					(+)		
Schüler 4								
Schüler 5	(+)	(+)			(+)	(+)		
Schüler 2								
Schüler 7	(+)	(+)				(+)		
Schüler 9								
Schüler 3	(+)	(+)				(+)		
Schüler 1								

Tabelle A.12: Bewertungstabelle

- **Teamarbeit**

innerhalb der Gruppen:

T1) Aufgabenteilung, T2) effizientes Arbeiten, T3) gemeinsame Problemdiskussion, T4) gemeinsame Problemlösung

innerhalb des Kurses:

T5) Verantwortung den anderen gegenüber (Umgang mit dem Laser, den Chemikalien, der Türschleuse), T6) Absprachen mit anderen Gruppen (Benutzung von Photometer und der Station zu den geschnittenen Hologrammen)

Name	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Bemerkungen zur Teamarbeit
Schüler 8							(-) siehe unten
Schüler 6							
Schüler 4							
Schüler 5							(-) siehe unten
Schüler 2							
Schüler 7							
Schüler 9							
Schüler 3							
Schüler 1							

Tabelle A.13: Bewertungstabelle

Schüler 2 und Schüler 6 hatten eine kleine körperliche Auseinandersetzung aus einem mir unbekanntem Grund, die aber sofort endete als ich sie zurecht wies.

Notenverteilung des Leistungskurses Physik

Tabelle A.14: Praktischen Leistungen

Name	Teil 1	Teil 2	praktische Gesamtnote
Schüler 1	1	2+	1
Schüler 2	2	3	2-
Schüler 3	2	2	2
Schüler 4	3	3	3
Schüler 5	3	2	2 -
Schüler 6	4	4	4
Schüler 7	4	2	3
Schüler 8	5	3	4
Schüler 9	5	2	3 -

Tabelle A.15: Praktisches und schriftliches Gesamtergebnis

Name	praktische Gesamtnote	schriftliche Prozentpunkte
Schüler 1	1	83% (87%)
Schüler 2	2-	66% (74%)
Schüler 3	2	76% (76%)
Schüler 4	3	63% (58%)
Schüler 5	2-	53% (61%)
Schüler 6	4	78% (73%)
Schüler 7	3	89% (88%)
Schüler 8	4	86% (81%)
Schüler 9	3-	68% (68%)

Hinweis:

Bei den schriftlichen Aufgaben des zweiten Teils sind immer zwei Daten angegeben. Die erste Zahl gibt die erreichten Punkte bzw. Prozente ohne die in der Zusatzaufgabe erreichbaren Punkte an. Die in Klammern stehenden Punkte bzw. Prozente enthalten die in den Zusatzaufgaben erreichten Punkte bzw. Prozente.

Würde die Zusatzaufgabe wie ursprünglich gedacht, einfach zu den erreichten Punkten bei gleich bleibender Gesamtpunktzahl addiert, würde sich eine extreme Verschiebung der Noten nach oben ergeben. Daher werden in dieser Tabelle die erreichten Punkte einmal mit und einmal ohne Zusatzaufgabe mit entsprechenden Gesamtpunktzahlen aufgeführt.

Tabelle A.16: Punkteverteilung der einzelnen schriftlichen Aufgaben Teil 1

Name/ Aufgabe	1.1.	1.2.	1.3.	2.1.	2.2.	2.3.	4.1.	4.2.	Gesamtpunktzahl	in %
max. Punktzahl	2	3	3	3	2	1	1	2	17	100%
Schüler 1	1,5	3	3	3	2	0,5	1	1,5	15,5	91%
Schüler 2	2	1,5	3	3	1	0,5	1	1	13	76%
Schüler 3	2	1,5	3	3	1	0,5	1	1	13	76%
Schüler 4	1	1	2	2,5	2	0	0	0	7,5	44%
Schüler 5	0	1	3	2,5	2	0	0	0	8,5	50%
Schüler 6	2	1	1	3	2	1	1	1,5	12,5	74%
Schüler 7	2	3	3	3	2	1	1	1,5	16,5	97%
Schüler 8	2	3	3	3	2	1	1	1,5	15,5	91%
Schüler 9	2	3	3	2	2	1	1	0,5	14,5	73%

Tabelle A.17: Punkteverteilung der einzelnen schriftlichen Aufgaben Teil 2

Name/ Aufgabe	2.1.	2.2.	3.1.	3.2.	Z.1.	Z.2.	Gesamtpunktzahl	in%
max. Punktzahl	1	3	1	3	1	3	8 (12)	100% (100%)
Schüler 1	1	1,5	0,5	3	1	3	6 (10)	75% (83%)
Schüler 2	1	1,5	0,5	1,5	1	3	4,5 (8,5)	56% (71%)
Schüler 3	1	1,5	0,5	3	1	2	6 (9)	75% (75%)
Schüler 4	1	1,5	1	3	1	1	6,5 (8,5)	81% (71%)
Schüler 5	1	1,5	0,5	1,5	1	3	4,5 (8,5)	56% (71%)
Schüler 6	1	1,5	1	3	1	1	6,5 (8,5)	81% (71%)
Schüler 7	1	1,5	1	3	1	2	6,5 (9,5)	81% (79%)
Schüler 8	1	1,5	1	3	1	1	6,5 (8,5)	81% (71%)
Schüler 9	1	2	1	1	1	1,5	5 (7,5)	63% (63%)

B Dankeschön!!!

Diese Staatsexamensarbeit wäre nicht möglich gewesen, wenn es da nicht viele Menschen gegeben hätte, die mich unterstützt haben. Und so möchte ich einige „Dankeschön“ verleihen. (Nobelpreise waren leider gerade aus...)

Klaus Wendt ein herzliches Dankeschön dafür, dass er mich „von der Schule weg engagiert“ hat und ich so über fünf Jahre hinweg stets meine Nase in diverse Schüler- und Didaktikaktivitäten stecken konnte. Außerdem für seine gute und freundschaftliche Betreuung über diese lange Zeit.

Annette Schmitt gilt ein Dankeschön, für die Idee die Leistungsbeurteilung an Experimenten in die Unterrichtsreihe einzubinden, außerdem für ihre Betreuung und das Korrekturlesen des Didaktikteils meiner Arbeit.

Nadine Coberger und Eva Pfeil für ihre Freundschaft, etliche 9 Uhr Kaffeekränzchen und dafür, dass sie in den letzten zwei Jahren einfach immer da waren.

Der Larissa Meute: Fabio Schweltnus, Christoph Mattolat, Sebastian Rader, Nadine Coberger, Eva Pfeil, Christian Ohlert, Tina Gottwald, Christoph Diehl, inklusiver unserer Hiwis: Christian Brecht, Rosa Glöckner, William Lindlahr, Ruth Poettgen und Volker Neises für die freundschaftliche Atmosphäre, die gemeinsamen Mittagessen und viele amüsante Kickerpausen und sonstige Aktivitäten. Ein besonderes Dankeschön geht an die drei Erstgenannten für die Unterstützung im Kampf mit - oder besser - gegen Tex. Außerdem an Fabio, für die Korrektur des Theorieteils zur Holografie und an Christian O. für seine Gastfreundschaft in seinem Büro, wenn ich mal wieder aus dem „Lehrerzimmer“ wegen diverser Schülerhorde verbannt wurde ;-). Christian B. dafür, dass er mir während meiner Arbeit einige Schülergruppen abgenommen hat und vor allem dafür, dass er die Holografie weiterführt, so dass ich sie in guten Händen weiß.

Den „Old Users“ der Larissa: Christopher Geppert, Kim Brück, Oliver Puschner, Philipp Schumann, Katja Wies, Annette Schmidt, Daniel Klein, Si-

mone Sirotzki, Dirk Tiedeman und Joachim Barth ebenfalls für die freundschaftliche Atmosphäre und vielen Kickerlehrjahren - mit einigen Tauchgängen meinerseits.

Dem Wiesbadener Gymnasium Gutenbergschule, besonders Frau Fischer und Herrn Geyer, die nicht nur Ihre Kurse zu Verfügung gestellt haben, sondern auch tatkräftige Hilfen waren.

Peter Becker für 5 Jahre Rat und Tat - nicht nur in Sachen Feinmechanik - und Frau Cornelia Kirch für die 5 Jahre Gastfreundschaft im Fotolabor und die wunderschönen Fotos, die sie für meine Arbeit gemacht hat.

Meinem Papa für die endlosen Korrekturvorschläge und meiner Mama für die moralische Unterstützung. Und beiden dafür, dass es sie gibt und mir das Studium ermöglicht haben.

Meinem Schatz Dominik Ostendorf dafür, dass er, obwohl er selbst für seine Staatsexamensprüfungen lernen musste, meine Arbeit korrigierte und mir beibrachte wie man Texte aufbaut - ja, ich bin halt doch eher ein Naturwissenschaftler als ein Sprachler. Außerdem ein dickes Dankeschön dafür, dass er, wenn ich mich mal wieder in Kleinigkeiten verrannt habe, mir regelmäßig die Welt wieder gerade gerückt hat und gezeigt hat, dass es auch noch andere Dinge außer der Examensarbeit gibt.

Meinem zweijährigen Patenkind Maja Leber, dafür dass sie mich, obwohl sie mich schon lang nicht mehr gesehen hatte, an Fastnacht - trotz Verkleidung - nach fünf Minuten doch noch erkannt hat und mir ein freudiges „Kätin“ entgegenschmettete. Ihrer Mama - meiner kleinen großen Schwester - Melanie und ihrem Papa Stephan, für viele schöne Spiele- und Straußwirtschaftsabende, die jetzt hoffentlich wieder zunehmen werden.

A big thank you to Filipe Nogueira for his friendship and big help in all questions about holography.

Meiner Freundin Lili Arnold - einfach dafür, dass es sie gibt.

Und all meinen Freunden, die leider nicht mehr auf diese Seite passen.

C Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mainz, den 25. Februar 2007, _____

