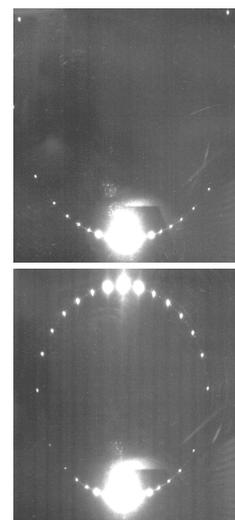
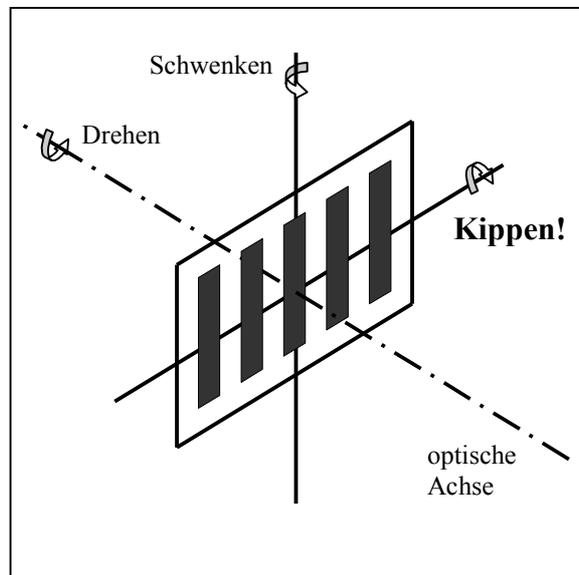
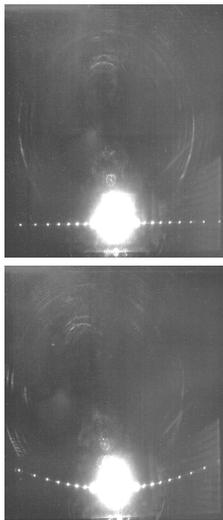


Wilfried Sommer

ZUR PHÄNOMENOLOGISCHEN BESCHREIBUNG DER BEUGUNG IM KONZEPT OPTISCHER WEGE

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINER UNTERRICHTSREIHE
FÜR DIE
GYMNASIALE OBERSTUFE



Frankfurt am Main (2004)

(D F 1)

ZUR PHÄNOMENOLOGISCHEN BESCHREIBUNG DER BEUGUNG
IM KONZEPT OPTISCHER WEGE

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINER UNTERRICHTSREIHE
FÜR DIE
GYMNASIALE OBERSTUFE

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Wilfried Sommer
aus Stuttgart

Frankfurt am Main (2004)
(D F 1)

vom Fachbereich Physik der Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation
angenommen.

Dekan:

Gutachter:

Datum der Disputation:

Danksagung

Die Entstehung der vorliegenden Arbeit ist auf vielfältigste Weise begleitet, unterstützt und gefördert worden. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle herzlichst bedanken.

Prof. Dr. SIEMSEN hat mit großer Sorgfalt verfolgt, wie der phänomenologische Ansatzpunkt der Arbeit sich in die Didaktik der Physik integrieren lässt, und dabei eine Fülle wertvoller Hinweise gegeben. Sein stetes Interesse und die in Offenheit und Toleranz geführten Gespräche prägten den gesamten Entstehungsprozess. Prof. Dr. GÖRNITZ nahm die Arbeitsergebnisse sehr positiv auf und wies im Rahmen von Diskussionen immer wieder auf Punkte hin, die man noch präziser fassen bzw. formulieren könnte. So entstand ein durchweg konstruktiver Arbeitskontakt. Sowohl Prof. SIEMSEN als auch Prof. GÖRNITZ gilt - zusammen mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Didaktik der Physik an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main - mein besonderer Dank.

Mit Dr. v. MACKENSEN und H.-C. OHLENDORF verbindet mich eine jahrelange Zusammenarbeit im Rahmen der Pädagogischen Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen, Abteilung Kassel. Für die zahlreichen Gespräche, Anregungen und Hinweise möchte ich mich vielmals bedanken; insbesondere auch dafür, dass sie mein Interesse für die Phänomenologie weckten und förderten. Hinzu kommen Dr. G. MAIER und Dr. J. VOGT, mit denen ich viele Fragen zur Optik und speziell zur Beugung bewegen und diskutieren konnte.

Eine Vielzahl von Diskussionen mit J. GREBE-ELLIS hat den Fortgang der Arbeit entscheidend geprägt. Die gemeinsamen Gespräche über unsere jeweiligen Promotionsvorhaben in der phänomenologischen Optik bildeten eine sehr feste und zuverlässige Grundlage, auf der die eigene Arbeit aufbauen konnte. Gleichzeitig ist über ihn eine enge und fruchtbare Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. L. SCHÖN, Didaktik der Physik am Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin, entstanden.

Ohne die finanzielle Förderung der Arbeit durch die Software AG-Stiftung und die Pädagogische Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen hätte diese Arbeit nicht angefertigt werden können. Mein besonderer Dank schließt auch die finanzielle Unterstützung eines vorangegangenen Projektes mit ein, bei dem Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation entwickelt wurden und aus dem teilweise Ergebnisse in diese Arbeit einfließen.

Den vielen originellen Ideen und der jugendlichen Frische der Schülerinnen und Schüler, wie sie im Unterricht auftraten, verdanke ich wertvolle Gesichtspunkte für die Entwicklung des gesamten Curriculums. Sie haben diese Arbeit an zentralen Stellen impulsiert.

Ganz besonders danken möchte ich zum Abschluss meiner Frau, die das Leben eines promovierenden Physikers liebevoll und mit humorvollem Verständnis begleitete. Nicht zuletzt ist in meinem familiären Umfeld die Arbeit nochmals sehr sorgfältig auf Schreibfehler hin durchgesehen worden.

Kassel, im Oktober 2004

Wilfried Sommer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen	5
2.1	Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie.....	5
2.1.1	Die Trias Subjekt - Methode - Objekt	5
2.1.2	Anliegen der Phänomenologie innerhalb der Trias Subjekt - Methode - Objekt	6
2.2	Zum Rahmen der Beobachtung.....	8
2.3	Zur Ordnung von Erscheinungsreihen.....	12
2.3.1	Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt	13
2.3.2	Erweiterung des phänomenologischen Ansatzes GOETHES.....	20
2.3.3	Vergleich mit der Theorie- und Modellbildung	22
2.4	Zusammenfassung der didaktischen und pädagogischen Leitziele	26
3	Das Konzept optischer Wege in seinem didaktischen Bezug zur phänomenologischen Optik und zum Lichtwegkonzept.....	29
3.1	„Modellfreie Optik“ nach MACKENSEN und OHLENDORF, „Optik der Bilder“ nach MAIER	30
3.1.1	Zur Photometrie in der 6. und 12. Klasse.....	30
3.1.2	Zum Spiegel in der 7. und 12. Klasse	34
3.1.3	Die Brechung bzw. Hebung in der 8. und 12. Klasse.....	37
3.1.4	Zur Beugung.....	45
3.2	Das Lichtwegkonzept nach ERB und SCHÖN.....	51
3.2.1	Leitziele und kumulatives Lernen	52
3.2.2	Vom Sehen zur Optik - 6. und 7. Klasse.....	53
3.2.3	Geometrische Optik und das FERMAT-Prinzip - 9. und 10. Klasse.....	53
3.2.4	Weiterführende Optik in der Oberstufe.....	58

3.3	Das Konzept optischer Wege	62
3.3.1	Einleitendes Beispiel: Der rotierende Würfel.....	62
3.3.2	Operationale Definition optischer Wege.....	65
3.3.3	Curriculare Integration der optischen Wege in die modellfreie Optik von MACKENSEN	69
3.3.4	Das FERMAT-Prinzip im Kontext optischer Wege	72
4	Die Beugung im Konzept optischer Wege - Kerncurriculum	77
4.1	Einstieg: Freihandversuche.....	77
4.2	Eingebundene und abgelöste Versuche als komplementäre Perspektiven....	85
4.3	Der Übergang vom eingebundenen zum abgelösten Versuch	88
4.3.1	Die Verbindung von eingebundenen und abgelösten Beugungsversuchen.....	89
4.3.2	Einschub: Die Linse im Konzept optischer Wege.....	90
4.3.3	Analyse der optischen Weglängen.....	95
4.4	Das Sehen im Kontext der Beugung	101
4.4.1	Freihandversuch: Vom Durchblick zum Anblick.....	102
4.4.2	Zusammenfassung von Durchblick und Anblick im abgelösten Versuch - Optische Filterung und kontextuale Abbildung.....	103
4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse des Kerncurriculums	111
5	Die Beugung im Konzept optischer Wege - Erweiterungsmodule zum Kerncurriculum	113
5.1	Rotationen des Gitters: LAUE-Kegel.....	113
5.1.1	Versuche zu Rotationen des Gitters.....	114
5.1.2	Auswertung der Versuche zu Rotationen des Gitters.....	117
5.2	Zeigerformalismus und Übergang zur Quantentheorie	123
5.2.1	Einführung des Zeigerformalismus	123
5.2.2	Übergang zu holistischen Eigenschaften der Quantentheorie	127
5.2.3	Diskussion des Übergangs zur Quantentheorie.....	130
5.2.4	Ausblick auf die Atomphysik	133
5.3	Ausblick auf die Interferometrie und Holographie	133
5.3.1	Das MICHELSON-Interferometer.....	133
5.3.2	Ausblick auf die Holographie	136

5.4	Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel.....	139
5.4.1	Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel bei Rotationen des Gitters.....	145
5.5	Ausblick auf weitere mögliche Erweiterungsmodule	149
6	Erprobung.....	151
6.1	Vorstudien	152
6.1.1	Vorstudien im Leistungskurs.....	152
6.1.2	Vorstudien durch die Schülervorlesung	156
6.2	Abschließende Erprobung - Ziele und Methoden der Untersuchung	160
6.2.1	1. Ziel: Dokumentation und Charakterisierung der epistemologischen Überzeugungen	160
6.2.2	2. Ziel: Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses	163
6.3	Abschließende Erprobung - Probandengruppe.....	164
6.4	Abschließende Erprobung - Ergebnisse.....	165
6.4.1	Übersicht über die Abfolge der Unterrichtsinhalte.....	165
6.4.2	Dokumentation der epistemologischen Überzeugungen	167
6.4.3	Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses	171
6.5	Diskussion der Ergebnisse	174
7	Zusammenfassung.....	179
	Literaturverzeichnis.....	181
	Anhang A: Aufgaben, Klausuren	189
	Anhang B: Fragebögen	197
	Anhang C: Glossar.....	201
	Lebenslauf.....	203

1 Einleitung

Lernen Schülerinnen und Schüler oder Studentinnen und Studenten die Quantenphysik kennen, so kann das erschreckend und wunderbar zugleich sein. Erschreckend, da das Weltbild der klassischen Physik zu wanken beginnt, wunderbar, da etwas wirklich Neues die menschliche Erkenntnis herausfordert. Was es heißt, etwas zu verstehen, muss neu bedacht werden. Das Weltbild der Physik wandelt sich dahingehend, dass man „den anschaulichen Bestimmungsstücken der Natur“ nicht mehr „einen vom jeweiligen Beobachtungszusammenhang unabhängigen ‚objektiven‘ Sinn“ zuschreiben kann (WEIZSÄCKER 2002, S. 95). Dieser Wandel ist tiefgreifend.

Die Beugung steht an dieser Grenze von der klassischen Physik zur Quantenphysik. Ein viel in Schulen gebräuchliches Lehrbuch stellt, im Rückgriff auf FEYNMAN, diese Grenze wie folgt dar (DORN 2000, S. 252): „R. FEYNMAN sagte, schon am Doppelspalt zeige sich das ganze Geheimnis der Quantenphysik, das niemand *verstehen* könne. *Verstehen* bedeutet nämlich ein Zurückführen auf anschauliche Modelle. Wir sollten uns nicht darüber wundern, dass zum *Beschreiben* der Quantenwelt die formalen ψ -Funktionen nötig sind, wohl aber darüber, dass sie bei der Riesenfülle verschiedenartigster Experimente ausreichen.“

Die vorliegende Arbeit greift die Unterscheidung zwischen dem Rekurs auf anschauliche Modelle und dem beschreibenden Ansatz der Quantentheorie *in methodischer Hinsicht* auf und untersucht am Beispiel der Beugung, ob der beschreibende Ansatz der Quantentheorie nicht von Anfang an ein Verständnis der Beugungserscheinungen ermögliche. Damit wird aber mit Verständnis etwas anderes bezeichnet als eine Rückführung auf anschauliche Modelle. Den Ausgangspunkt bildet vielmehr ein beschreibender Ansatz, der die physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen anstrebt und insbesondere *innerhalb* der Erscheinungsreihen Ordnungselemente aufsucht. Die beschreibende Struktur dieser durchaus auch formalen Ordnungselemente stellt die verschiedenen Experimente in einen übergeordneten Zusammenhang. Verstehen bezeichnet dann die Tatsache, dass dieser übergeordnete Zusammenhang erkannt wird.

Dadurch, dass der beschreibende Ansatz nicht erst im Rahmen der Quantenphysik zum Tragen kommt, sondern sich durch den Unterricht durchzieht, vernetzt er die entsprechenden

Unterrichtsinhalte vertikal und erweist sich als ein umfassender, tragfähiger Rahmen. Außerdem legt er frühzeitig die Denkweise der Quantenphysik an in der Hoffnung, dass die Schülerinnen und Schüler zu einer Physikrezeption finden, die das traditionell-empiristische Wissenschaftsbild übersteigt.

Es ist ein Ziel dieser Arbeit zu zeigen, dass die Beugung gemäß dieses beschreibenden Ansatzes unterrichtet werden kann und dass dieser Ansatz eine solide Referenz für Methodendiskussionen im Rahmen des Physikunterrichtes darstellt.

Im zweiten Kapitel wird zuerst der oben genannte Ansatz einschließlich der Ordnung von Erscheinungsreihen charakterisiert und diskutiert; insbesondere wird dabei auch erläutert, was der Ausdruck immanentes Ordnungselement bezeichnet. Die Nähe des methodischen Ansatzes zur Phänomenologie kommt dort ebenso zur Sprache wie der Rückgriff auf die Anliegen WAGENSCHAINS.

In den letzten Jahren sind zahlreiche Forschungsarbeiten im Bereich der Optik durchgeführt worden, die von phänomenologischen oder der Phänomenologie nahestehenden Ansätzen ausgehen und außerdem dem Beschreiben einen hohen Stellenwert beimessen. Diese Ansätze werden im dritten Kapitel zunächst rezipiert. Im Anschluss werden die optischen Wege über eine operationale Definition, die vom Sehen ausgeht, gefasst und insbesondere das FERMAT-Prinzip in das Konzept optischer Wege integriert. Außerdem wird erläutert, inwiefern die optischen Wege für zahlreiche Versuche ein den Versuchsreihen immanentes Ordnungselement darstellen, über welches der Zusammenhang der Versuche beschrieben werden kann. Damit ist mit den ersten beiden Kapiteln umrissen, welche methodische Richtung der Titel dieser Arbeit - *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege* - bezeichnet.

Die didaktische Elementarisierung zur Behandlung der Beugung im Konzept optischer Wege gliedert sich in ein Kerncurriculum und in Erweiterungsmodule. Ersteres wird im vierten, Letztere hingegen werden im fünften Kapitel thematisiert.

Wie schon die operationale Definition des optischen Weges im dritten Kapitel setzt auch im vierten Kapitel das Kerncurriculum unmittelbar am Sehen an; dort allerdings in Form von Freihandversuchen zur Beugung. Der Übergang von Freihandversuchen zu Versuchen, bei denen an Stelle des Auges eine Linse und ein Schirm treten, wird danach innerhalb des Kern-

curriculum nicht nur vorgeschlagen, sondern auch didaktisch diskutiert und bewertet. Mit diesem Übergang zeigen sich die optischen Wege als ein Strukturmerkmal hoher Erklärungsmächtigkeit: es sind dort zwei Bedingungen an die optischen Wege, welche das FERMAT-Prinzip aufgreifen und erweitern und zur Beschreibung der Beugungserscheinungen am Gitter genügen.

Durch die Versuchsreihen in Form von Freihandversuchen zu Beginn des Kerncurriculums zeichnen sich die Beugungserscheinungen als Erscheinungen aus, die im Durchblick durch kleine Strukturen als vervielfachte Bilder kontrastreicher Lampenansichten auftreten. Mit dem Übergang vom Durchblick zum Anblick dieser Strukturen geht das Beugungsbild in das Abbild über. Die Darstellung des Zusammenhangs von Beugungs- und Abbild im Konzept optischer Wege vertieft nicht nur das Verständnis des Sehens erheblich, sondern gleichzeitig wird das Bedingungsgefüge des Sehens in einem geschlossenen Rahmen überblickt. Es wird zum Ende der Darstellung des Kerncurriculums im vierten Kapitel von daher aufgezeigt, inwiefern das Curriculum auf kumulative Lernprozesse hin angelegt ist und das Sehen den Kontext der Unterrichtsreihe bildet.

Sowohl das vierte als auch das fünfte Kapitel sind so gefasst, dass sie neben einer didaktischen Diskussion der Unterrichtsinhalte vor allem konkrete Anregungen für die Planung möglicher Unterrichtsreihen bereitstellen. Dabei haben die im fünften Kapitel vorgestellten Themen mehr optionalen Charakter. Dort wird zunächst gezeigt, wie sich die Tatsache, dass sich bei Rotationen des Gitters Beugungsbilder in Form von Kegelschnitten ordnen, vollständig aus den beiden Bedingungen an die optischen Wege, wie sie im Kerncurriculum formuliert sind, herleiten lässt. Die Erklärungsmächtigkeit des gewählten Ansatzes steht hier im Mittelpunkt und wird gegen Ende des Kapitels nochmals unter Beweis gestellt, wenn die Verbindungen zur Festkörperphysik, insbesondere zum reziproken Gitter und zur EWALD-Kugel, aufgezeigt werden.

Außerdem wird dort thematisiert, wie sich die Erweiterung auf Beugungsexperimente darstellt, bei denen die Beleuchtung in Form quantenhaft auftretender Leuchtereignisse zu beschreiben ist. Es zeigt sich dort das Konzept optischer Wege als weiterhin tragfähig, weil in diesem Konzept ausschließlich die räumlichen Bedingungen des Erscheinens auf die räumliche Form des Beugungsbildes bezogen werden. Das *gesamte* räumliche Bedingungsgefüge bleibt auch dann wirksam, wenn der Leuchtprozess selber quantenhaft auftritt. - Die Gesamt-

heit des Bedingungsgefüges nimmt inhaltlich Bezug auf das Kerncurriculum. Der holistische Ansatz der Quantentheorie greift vorangegangene Unterrichtsinhalte auf und vertieft sie. Der methodische Rahmen wird stärker vernetzt. Dies wird im Einzelnen dargestellt und diskutiert. Im sechsten Kapitel wird schließlich die Erprobung bzw. unterrichtliche Realisierung des Curriculums dokumentiert. Dabei kommen auch Erfahrungen zur Sprache, die innerhalb jahrelanger Unterrichtspraxis während der Entwicklung des Curriculums gemacht wurden. Schließlich ist dort auch die Erprobung nach Abschluss der Curriculumentwicklung dokumentiert. Nach einer Zusammenfassung im siebten Kapitel finden sich Fragebögen und Klausuren im Anhang.

2 Physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen

2.1 Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie

2.1.1 Die Trias Subjekt - Methode - Objekt

Geht man in der Physik auf die systematische Ordnung angetroffener Erscheinungen bzw. gegebener Phänomene zu, so liegt dieser Unternehmung stets eine Methode zugrunde, die den Umgang mit den Erscheinungen im Rahmen der Erkenntnisbemühungen bestimmt. Das Gegebene wird unter methodischen Gesichtspunkten bearbeitet - die Konzentration auf die Sache läuft Hand in Hand mit methodischen Konzepten oder Präkonzepten. Nach LITT stellt sich die Konzentration auf die Sache dergestalt dar, dass „der Mensch den frei dahinflutenden Strom seiner Erlebnisse nach Maßgabe der logischen Prinzipien, auf denen die Methode beruht, eindämmt, reguliert und auf bestimmte Erkenntnisziele hin ausrichtet“ (LITT 1959, S. 56).

In diesem Prozess tritt ein Doppeltes auf: Das ganze Interesse, die Gedankenbewegungen, die Persönlichkeit organisieren sich auf die Sache hin und Letztere vergißt dabei ihrer selbst. Bewusstseinsinhalt bildet, was die Sache vorgibt. Damit setzt sich die Persönlichkeit von einer unbewussten, unwillkürlich-assoziativen Gedankenbewegung ab, sie geht methodisch zielgerichtet vor und wird so zum Subjekt, das sich wissenschaftlich mit seiner Umwelt beschäftigt. Es ist *eine* Tätigkeit, zu der *sowohl* die Konzentration auf den Inhalt *als auch* die Absetzung als Subjekt gehören. Die Organisation der Persönlichkeit zum Subjekt im Sinne von LITT läuft also nicht dem methodischen Vorgehen voraus, sondern ist unmittelbar mit dem Akt der Konzentration im Rahmen einer methodisch vorgehenden Erkenntnisunternehmung verbunden. Innerhalb dieser Tätigkeit bilden Subjekt und Methode eine Gesamtheit, wenn man, wie LITT, das Subjekt als die soeben umrissene menschliche Existenzform in ihrer Gegenüberstellung zu den Objekten der Natur fasst.

Indem das Subjekt sich den Gegenständen gemäß der von ihm verfolgten Methode zuwendet, kann es Vermutungen erhärten oder verwerfen, Verwandtes bemerken oder Erscheinungen in kleinere Ordnungsstrukturen trennen und Hypothesen verifizieren oder falsifizieren. Dabei öffnet sich ein riesiges Feld möglicher Bezüge. Allein schon die Hypothesenbildung lässt ver-

schiedenste Ansätze zu, beispielsweise die Bildung eines anschaulichen Modells, einer abstrakten Theorie oder die Suche nach maßgeblichen Bedingungen für die beobachteten Erscheinungszusammenhänge. Die Suche nach dem Zusammenhang fordert von dem methodisch vorgehenden Subjekt, dass es sich positioniert. Bei aller Vielfalt ist die jeweils zur Anwendung kommende Methode trotzdem zumindest so weit auf das Objekt abgestimmt, dass wahre und falsche Aussagen unterschieden werden können. Das „Verhör-Reglement“ (WAGENSCHHEIN 1970, S. 20), mit dem man als „bestallter Richter“ die Natur in den Zeugenstand ruft (KANT 1974, S. 23), passt zumindest in diesem Rahmen zu ihr, wenn auch je nach angewendetem „Reglement“ die Ergebnisse unterschiedlich sind. Obwohl man nach Maßgabe der Methode verschiedene Ergebnisse und Erkenntnisse gewinnt, gliedern sich doch die untersuchten Objekte der Beziehung von Subjekt und Methode an, welche durch die aktualisierte Untersuchungsrichtung vorgegeben wird. Subjekt, Methode und Objekt sind wechselseitig aufeinander bezogen. Methodische Fragen stehen im Kontext dieser Wechselbeziehung. - Die von LITT eingeführte Trias Subjekt - Methode - Objekt (LITT 1959, S. 59) soll hier an den Ausgangspunkt einer Untersuchung gestellt werden, die methodische Aspekte der Erscheinungsordnung im Rahmen der Phänomenologie und später im Kontext des Konzeptes optischer Wege thematisiert.

2.1.2 Anliegen der Phänomenologie innerhalb der Trias Subjekt - Methode - Objekt

Die Bezeichnung Phänomenologie wird im wissenschaftlichen Umfeld und insbesondere in der Philosophie (STÖRIG 1993), der Kognitionswissenschaft (PÖRKSEN 2002) und der Didaktik (GREBE-ELLIS 2003) in unterschiedlicher Weise verwendet. In dieser Arbeit kommt der Begriff Phänomenologie dahingehend zur Anwendung, dass eine „Lehre von den Erscheinungen“ gepflegt wird, welche in einem ersten Schritt die Erscheinungen möglichst exakt und vielfältig innerhalb des Umfeldes konstatiert, in dem sie auftreten. In der Terminologie WAGENSCHHEINS (1962, S. 40 ff.) gesprochen dürfen zu Beginn die Dinge ausreden, sich in ihrem Sosein aussprechen. Die beobachtende Persönlichkeit lässt sich von den Dingen mit der Fülle ihrer Sinneswahrnehmungen beeindrucken und sucht, davon ausgehend, den Weg zum Zusammenhang der Erscheinungen. Dabei lässt sie das Maß der Dinge die Erscheinungen selbst sein und im Beziehungsgefüge der auftretenden Erscheinungen sucht sie den Zusam-

menhang auf. Sie erhält einen hohen Stellenwert; ihr wird die Kompetenz zugesprochen, während sie wahrnimmt, sich im Spannungsfeld zwischen Reduktion und Detailfülle selbstbestimmt bewegen zu können. Die Trias Subjekt - Methode - Objekt ist gekennzeichnet durch ein Subjekt, welches sein methodisches Vorgehen in hohem Maße durch die Phänomene selbst im Kontext ihres Erscheinens bestimmen lässt.

In einem zweiten Schritt werden bedingende Faktoren genau erforscht, die entscheidenden Variablen durch Versuchsreihen heraus gesondert und die Erscheinungen nach Maßgabe des erforschten Bedingungsgefüges geordnet. Das den Erscheinungen bzw. Erscheinungsreihen immanente Bedingungsgefüge tritt hervor, es kann als Bedingungsurteil formuliert oder durch Ordnungselemente beschrieben werden, welche sich im Kreis der Phänomene zeigen, die insofern also auch den Phänomenen selbst eingeschrieben sind. Der zweite Schritt ist ein kognitiver Vorgang, in welchem aber die Verknüpfungen im Rekurs auf die Erfahrung bzw. die auftretenden Erscheinungen vonstatten geht.

Jedem dieser beiden Schritte ist im Folgenden ein Unterkapitel gewidmet. Dabei wurde die Unterteilung des methodischen Vorgehens im Hinblick auf eine leichtere Kommunikation des Inhaltes gewählt; selbstverständlich sind die Grenzen fließend, die genannten Schritte bleiben eine methodische Einheit. In diesen Unterkapiteln soll auch thematisiert werden, welche Ausgestaltung sich für die Trias Subjekt - Methode - Objekt durch die zuvor charakterisierte Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie ergibt.

Die hier skizzierte Bedeutung des Wortes Phänomenologie steht damit in einer gewissen Nähe zur Terminologie der Kognitionswissenschaft. Dort versteht z. B. VARELA unter der Phänomenologie ein Programm, in welchem es gilt, „ohne Vorurteile und vorschnelle Wertungen die eigenen Erfahrungen und Wahrnehmungen zu erforschen, sich selbst als Wissenschaftler in die Reflexion mit einzubeziehen, um eine entkörperte, rein abstrakte Analyse zu vermeiden“ (PÖRKSEN 2002, S. 120). Die zuvor geschilderte Beobachtungskultur entspricht in vielen Aspekten der Darstellung VARELAS.

Des Weiteren existiert ein enger Zusammenhang zu dem Programm der naturwissenschaftlichen Arbeiten GOETHES, wie dieser selbst es in seinen „Maximen und Reflexionen“ (GOETHE 1966, Bd. 12) oder in seinem Aufsatz „Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt“ (GOETHE 1966, Bd. 13) dargestellt hat. Auch die Stellungnahmen MACHS in seinen populär-

wissenschaftlichen Vorlesungen zum Vorgang des Erklärens weisen in diese Richtung (MACH 1910). Dies wird noch im Einzelnen zu erläutern sein.

Die Phänomenologie HUSSERLS (STÖRIG 1993, S. 596) steht mit der Fülle ihrer Positionen nur in Teilaspekten hinter der hier angewendeten Bezeichnung Phänomenologie wie auch unter dem Begriff Phänomenologie mehr verstanden wird als die mancherorts übliche Wortwahl für die erste Phase einer wissenschaftlichen Arbeit.

2.2 Zum Rahmen der Beobachtung

Die Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie, so wie sie im vorigen Kapitel skizziert wurde, spricht der Beobachtung einen hohen Stellenwert zu und fordert damit von der beobachtenden Persönlichkeit eine entsprechende Kompetenz. Die Didaktik und Methodik des Physikunterrichtes müssen dieses Kompetenzprofil anlegen und pflegen. Dafür können viele Anregungen WAGENSCHAINS (1962) aufgegriffen werden.

WAGENSCHAIN hat sich immer wieder auf die von LITT eingeführte Trias Subjekt - Methode - Objekt bezogen und dabei insbesondere die Ausprägungen des Subjektes in seinen methodisch vorgehenden Beobachtungsbestrebungen beschrieben. Eine der ersten Beobachtungsschritte stellt das *Schauen* dar. Indem die beobachtende Persönlichkeit schaut, lässt sie die Dinge für sich sprechen, sie lässt sie ausreden und enthält sich einer zuspitzenden Fragestellung, welche bestimmte Bereiche der Wahrnehmung ausblendet. Der Natur wird hier noch nicht ins Wort gefallen, wie die Beobachterin oder der Beobachter auch die Fülle ihrer sinnlichen Eindrücke aufsucht und nicht von vornherein gewisse Seiten des eigenen Wesens als Nebensächlichkeit übergeht. Fern von Ursachen und Zweckmäßigkeit sind auf dieser Stufe die Erscheinungen ein „sich selbst Darstellendes“, welches die menschlichen Sinne aufschließt.

In einer nächsten Stufe geht dieses Schauen in ein *sachliches Sehen* über. An die Stelle von Verwunderung, Anmutung und emotionaler Betroffenheit treten Fragen nach dem Zusammenhang. Die Verstandestätigkeit regt sich und sucht auf, wie die eine Erscheinung mit der anderen zusammenhängt, sie sondert wesentliche von unwesentlichen Faktoren und findet, inwiefern genau zu benennende Elemente bestimmte Erscheinungen bedingen.

Indem das Bedingungsgefüge systematisch aufgesucht wird, geht das sachliche Sehen fast fließend in ein *planvolles Sehen* über. - Damit ergibt sich gleichzeitig die Brücke zum Experiment.

Im Experiment dominieren scharfe, isolierende Fragestellungen, die auf eine Eindeutigkeit im Bedingungsgefüge abzielen. Die Erscheinung wird in einen so weit wie möglich abgeschlossenen Kontext wirksamer Bedingungen gestellt. An die Stelle der möglichst vorurteilslosen, offenen Beobachtungshaltung auf der ersten Stufe des Schauens tritt nun die Strategie und die Reduktion der zugespitzten, scharfen Beobachtung im planvollen Sehen. Gleichzeitig setzt die beobachtende Persönlichkeit an die Stelle von Verwunderung, Anmutung und emotionaler Betroffenheit zunehmend die verstandesmäßige Führung ihrer Beobachtungshandlungen. Denken und Handeln stehen so nahe beieinander (SCHÖN 1994). Die gedankliche Tätigkeit der Beobachterin oder des Beobachters orientiert sich unmittelbar am Experiment, die logische Zulässigkeit gedanklicher Bezüge und die Aussage des Experimentes stehen in einem intensiven dialogischen Wechselprozess. Am Ende dieses Prozesses stehen Aussagen der Form: „Jedesmal, *wenn* man dieses tut, *dann* geschieht jenes“.

WAGENSCHNEN nennt die zuletzt angeführte Aussageform der Wenn-Dann-Sätze das Schema der Kausalität (WAGENSCHNEN 1962, S. 43). Er beschreibt damit über mehrere Stufen, wie die Beobachtung zu einer kausalen Auffassung physikalischer Vorgänge führt. Daran schließen sich weitere Schritte an, die hier nicht im Einzelnen besprochen werden sollen. Vielmehr wurde mit einer gewissen Ausführlichkeit auf WAGENSCHNEN Bezug genommen, weil seine Schilderung der Art, wie sich das Fundament einer Erfahrungserkenntnis ausbilden kann, mit dem Ausgangspunkt einer phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege übereinstimmt. Eine qualitative Ordnung der Beugungserscheinungen bildet ein erstes Lernziel des hier vorgestellten Curriculums. Die Kausalität in Form von Wenn-Dann-Sätzen als Ergebnis geführter Beobachtungshandlungen steht dort am Anfang. Eine weitere Ordnung der Erscheinungen schließt sich an, auf die im folgenden Kapitel einzugehen sein wird. Zuvor sollen aber noch weitere Bezüge zum Stellenwert der Beobachtung im Bereich der Fachdidaktik thematisiert werden.

ERB formuliert in seiner Arbeit „Optik mit Lichtwegen“ (ERB 1994) verschiedene Leitziele, die dem von SCHÖN und ihm entwickelten Lichtwegkonzept (SCHÖN 1992) zugrunde liegen.

Sein Leitziel 2, „Beobachtung als Ausgangspunkt“, fasst er dahingehend zusammen, dass die Beobachtung die Brücke zwischen der möglichst unvoreingenommenen Wahrnehmung und der physikalischen Beschreibung darstelle. Ihr käme deshalb besondere Bedeutung für die physikalische Erkenntnisbildung zu. Er betont, dass die Inhalte in ihrer Anbindung an die Phänomene von zentraler Bedeutung sind und damit die zu frühe Reduktion eines Experimentes, in der die Physik auf bestimmte Fragestellungen eingeengt wird, unter Umständen den Schülern den Blick für die Wege versperrt, die vom Experiment wieder zurück in die Lebenswelt führen. SCHÖN erweitert den Gedanken noch auf den Zusammenhang von Experiment und Wirklichkeit (SCHÖN 1994): In einem geführten Beobachtungsprozess, wie ihn WAGENSCHNEIDER beschrieben hat, werden die Schülerinnen und Schüler sich des Zusammenhangs von Gedankenwelt und Wirklichkeit bewusst. Sie können erleben, wie durch das Denken viele Eindrücke sinnvoll zu ordnen und zu ergänzen sind. Dabei werden von einem sicheren Fundament der Sinneswahrnehmung gestützte gedankliche Zusammenhänge mit einem höheren Wahrheitswert belegt als solche gedankliche Zusammenhänge, deren Fundament dünn oder gar spekulativ ist.

Durch die Aussagen SCHÖNS bekommt das Leitziel 2, Beobachtung als Ausgangspunkt, eine epistemologische Seite: Für die Schülerinnen und Schüler entwickelt sich durch den Gang des Unterrichtes ein Wahrheitsbegriff oder - weniger absolut formuliert - eine Kohärenz der Gesichtspunkte, die sich in unmittelbarer Verbindung, in direkter Nähe zur Natur konstituiert. Für weitere fachmethodische Untersuchungen und ontologische Fragestellungen dient ihnen dieser Begriff als Referenz. Als pädagogische Vorteile können hier zum einen die große Nähe zur Natur in einem dialogischen Beobachtungsprozess gesehen werden, wie auch das Erlebnis eines Weges von der sinnlichen Wahrnehmung zum Begriff und wieder zurück zur erlebten Wirklichkeit, das von zentraler Bedeutung für den Weltkontakt der Schülerinnen und Schüler sein mag.

Die physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen setzt also bei einem geführten Beobachtungsprozess an, wie ihn ERB, SCHÖN, WAGENSCHNEIDER und viele andere beschrieben haben. Der dialogische Umgang mit der Natur wird hier angestrebt und als wesentliches Merkmal angesehen.

Wenn die Stufen des Schauens, des sachlichen und planvollen Sehens durchlaufen und die bedingenden Faktoren bestimmt werden, so schließt dieser Prozess ein, dass Hypothesen zu formulieren, überprüfen und im Anschluss zu bestätigen oder verwerfen sind. Dabei bleibt es grundsätzlich der forschenden Persönlichkeit überlassen, ob sie nur Hypothesen formuliert, die auf den Kreis der beobachteten Erscheinungen rekurrieren, oder ob sie prinzipiell unbeobachtbare Größen in ihre Hypothesenbildung einbezieht und die Erscheinungen als Wirkung dieser unbeobachtbaren Größen ansieht. Letzteres liegt beispielsweise vor, wenn ein anschauliches Modell konstruiert wird, dessen Größen so gefasst werden, dass sie die Erscheinung hervorbringen sollen: Werden die Lichtstrahlen des Strahlenmodells als Ursache für die Erhellung einer Fläche gedacht, so geht man von einem Kausalitätsbegriff aus, der den nicht wahrzunehmenden Lichtstrahl als Ursache für die angetroffene Erscheinung als Wirkung ansieht.

Die physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen im Rahmen der Darstellung des hier entwickelten Curriculums zur Beugung vermeidet eine Hypothesenbildung, die den Rekurs auf die beobachteten Erscheinungen verlässt. Sie tritt an die Erscheinungen fragend heran und stellt nur insofern Hypothesen auf, als es gilt, Bedingungen für Erscheinungen in der Durchmusterung des Konkreten aufzufinden. Ihr Kausalitätsbegriff entspricht in einer ersten Stufe dem Bedingungsurteil WAGENSCHAINS, wohingegen sie kausale Strukturen, wie sie in der Formulierung anschaulicher Modelle üblich sind, vermeidet. Damit entlässt sie das Experiment aus seinem Beweiszwang im Rahmen der Modellphysik und sucht im Angetroffenen ein Bedingungsnetz auf. Diesem Vorgehen ist eine große Naturnähe inhärent. Es gilt, den wachen Gebrauch der Sinne zu üben, die Freude an der Vielfalt der Erscheinungen zu entdecken, die Phänomene zu beschreiben und erst aus der Fülle des Wahrgenommenen zur urteilenden Bearbeitung des Erscheinungskomplexes fortzuschreiten. Es wird versucht, die Physik als eine Wissenschaft von der Natur und nicht nur vom Labor zu unterstreichen (SIEMSEN 2002), den Stellenwert des Beschreibens in den Vordergrund zu stellen (ERB 1994) und die wissenschaftliche Sichtweise aus dem täglichen Erleben heraus zu entwickeln (SCHÖN 1994).

Den Lernkontext bilden die Phänomene selbst. Innerhalb der Trias Subjekt - Methode - Objekt stellt sich zwar das beobachtende Subjekt der Natur gegenüber, indem es als Subjekt seine Beobachtungshandlungen wie dargestellt führt. Es nimmt aus dieser - oder besser: seiner -

Gegenüberstellung aber nicht die Rechtfertigung, dem Kontext der Phänomene eine Ordnung vorzugeben, die zwar denkbar ist, nicht aber diesem Kontext selbst entspringt. Von dem Wahrnehmungsinhalt wird die *eine* Tätigkeit (Kapitel 2.1.1), zu der *sowohl* die Konzentration auf die Sache, hier: auf die Phänomene, *als auch* die Absetzung als Subjekt gehören, bestimmt. An die Stelle einer reinen Gegenüberstellung von Subjekt und Objekt tritt vielmehr das Bestreben, eine Einheit durch den Kontext der Phänomene zu erreichen. Die Trias Subjekt - Methode - Objekt entfaltet sich in einheitlichen Rahmen.

2.3 Zur Ordnung von Erscheinungsreihen

Bereits im vorigen Kapitel wurde beschrieben, wie die Beobachtung der Erscheinungen oder der Versuchsreihen fast fließend sich zu einer systematisierenden Ordnung des Gegebenen hin entwickelt. Es werden schon bald beim Experimentieren Gedankenwege aufgesucht, durch welche die Fülle der Einzelheiten in einen sinnvollen Kontext zu stellen sind. Die Physik wird zu einer theoriegeleiteten Erfahrungswissenschaft (EPA 2004).

Durch weitere Experimente werden dann Gedankenwege bzw. Hypothesen bestätigt oder verworfen und es treten übergeordnete Gesichtspunkte hervor. So ergibt sich im Laufe der Zeit ein mehr oder weniger kohärentes Ganzes. - Indem man dieses Ganze erarbeitet, geht man logisch stringent vor. Das darf allerdings nicht über die Tatsache hinweg täuschen, „dass es keinen direkten, logisch zwingenden Weg von empirischen Daten zu einer ganz bestimmten Theorie gibt“ (BLEICHROTH 1999, S. 79). Wie die Beobachtungen zusammengeschaут werden, was als Erklärung aufgefasst wird, darüber besitzt der Mensch im Rahmen seiner kognitiv-intellektuellen Fähigkeiten weitgehende Freiheit. Womit dieser Freiraum methodisch ausgefüllt wird, wenn man auf eine Ordnung von Erscheinungsreihen abzielt, ist entscheidend und wird daher das Thema dieses Kapitels sein.

Die Formulierung FEYNMANS: „Aber der wirkliche Triumph der Wissenschaft besteht darin, dass wir einen solchen Gedankenweg finden können, dass das Gesetz einleuchtend erscheint“ (FEYNMAN 1973) muss einerseits dahingehend geklärt werden, wie solche Gedankenwege im Rahmen dieser Arbeit aussehen, und andererseits muss beschrieben werden, was dann als ein Gesetz zu fassen ist. Dabei wird zunächst auf GOETHES naturwissenschaftliche Vorgehens-

weise Bezug genommen, wie er sie in seinem Aufsatz „Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt“ (GOETHE 1966, Bd. 13) dargestellt hat. Alsdann gilt es, dieses Vorgehen mit der physikalischen Erkenntnisbildung durch Theorien und anschauliche Modelle zu vergleichen. Nicht zuletzt soll damit - in Anlehnung an FEYNMAN - der zentrale Ansatz dieser Arbeit in Bezug auf die Ordnung von Erscheinungsreihen erläutert werden: *Die physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen besteht darin, eine solche Ordnung im Kreis der Phänomene selbst zu finden, dass das einzelne Phänomen einleuchtend erscheint.*

2.3.1 Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt

In der Zeit seiner ersten Veröffentlichung zur Farbenlehre (1792), den *Beiträgen zur Optik*, schrieb GOETHE einen Aufsatz mit dem Titel „Kautelen des Beobachters“, der wohl als Einleitung in ein spezielles Werk gedacht war und später mit dem Titel „Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt“ versehen wurde. In diesem Aufsatz formuliert er zentrale Elemente seiner naturwissenschaftlichen Methodik.

Der Aufsatz charakterisiert zunächst die Zielrichtung seiner naturwissenschaftlichen Untersuchungen. Es gilt, „die Gegenstände der Natur an sich selbst und in ihren Verhältnissen untereinander zu beobachten“ und gleichzeitig den Maßstab der „Erkenntnis, die Data der Beurteilung nicht aus sich, sondern aus dem Kreis der Dinge“ zu nehmen, die man beobachtet. Dies stellt sowohl an die Beobachtungshandlungen als auch an deren gedankliche Strukturierung im Erkenntnisprozess besondere Herausforderungen, die im Folgenden erläutert werden.

Ein wichtiges Element der Beobachtung ist eine ruhige, geführte Aufmerksamkeit; es gilt einen Blick zu üben, der konstatiert, „was ist, und nicht, was behagt“. Dabei spielt das wissenschaftliche Umfeld eine große Rolle: der Blick wird erweitert, voreilige Intentionen werden korrigiert, Stagnationen aufgelöst. GOETHE zählt zur Beobachtungsgabe auch bereits Verknüpfungen der Gegenstände untereinander und geht damit von einem fließenden Übergang hin zur gedanklichen Strukturierung des Beobachteten aus, doch untersucht er diesen Punkt nochmals gesondert. Zentrales Element in dem Übergang von der Beobachtung hin zur gedanklichen Struktur bildet der Versuch - er ist der Vermittler vom Subjekt hin zum Objekt.

Im Versuch gestaltet man einen Erfahrungsrahmen vorsätzlich und planmäßig. Phänomene kommen gezielt zur Darstellung, „die bedingten Umstände“ haben reproduzierbar bestimmte

Abläufe zur Folge. - Für sich genommen mag der Versuch bereits durch die Geschicklichkeit seiner Ausführung oder durch seine Konzeption beeindrucken. Seinen wissenschaftlichen Wert erhält er aber erst durch die Verbindung mit anderen Versuchen.

In der Verbindung und Bewertung der Versuche setzt nun die gedankliche Strukturierung an, der „Übergang von der Erfahrung zum Urteil“. Dieser Schritt wird zunächst psychologisch charakterisiert. Auf dem Hintergrund unzähliger historischer Beispiele und aus eigener Erfahrung beschreibt GOETHE eine der Natur des Menschen eigene Neigung, durch rasche Verbindung unterschiedlicher Erfahrungen diese für näher verwandt einzustufen, als sie es sind. Die Gewissheit, welche die wiederholte Ausführung eines Experimentes mit sich bringt, wird wie übertragen in eine Disposition, ähnliche Erscheinungen als unmittelbar verwandt zu akzeptieren. Hinzu kommt die Tatsache, dass „der Mensch ... sich nämlich mehr an der Vorstellung als an der Sache“ erfreut bzw. der Mensch sich nur einer Sache insofern erfreut, als „er sich dieselbe vorstellt“, als sie in seine „Sinnesart“ passt. Auf dem Hintergrund seines „Trieb(es) nach Kenntnis“ und seines Bedürfnisses, „Gegenstände in ein gewisses fassliches Verhältnis zu bringen“ entwickelt sich der Hang hin zu Theorien oder theoretischen Systemen.

Anliegen der GOETHESCHEN Methodik ist es nun, diese intellektuell-emotionale Disposition nicht als Ausgangspunkt einer beliebigen Entfaltung von Theorien zu wählen. Die „schöpferisch unabhängige Kraft“ der Seele soll vielmehr dafür gebraucht werden, Verhältnisse aufzufinden, die durch und durch den sinnlichen Wahrnehmungsinhalten eingeschrieben sind. Diese zeigen sich, wenn eine Erfahrung nach allen Seiten hin und in allen ihren Modifikationen verfolgt und durchgearbeitet wird. Auch dabei werden Hypothesen formuliert, ihre Anwendungen bleiben aber mittelbar.

Die unmittelbare Anwendung einer Hypothese bedeutet für GOETHE, durch Versuche die Hypothese eben unmittelbar zu verifizieren oder falsifizieren, d.h. mit der „schöpferisch unabhängige(n) Kraft“ des Geistes formulierte Konzepte einer Entscheidungssituation im Experiment zu unterwerfen. Dabei mag das Experiment sogar für sich alleine stehen, kann die forschende Persönlichkeit doch durch scharfsinnige Überlegungen der Tatsache begegnen, dass nur wenig experimentelle Daten zur Verfügung stehen, wie es ihr auch möglich ist, „zugunsten einer Hypothese oder Theorie die einzelnen Versuche gleich Argumenten zusammen(zu)stellen“. Eine solche unmittelbare Anwendung der Hypothesenbildung lehnt GOETHE mit einer gewissen Schärfe durch polemische Vergleiche ab.

Als mittelbare Anwendung von Hypothesen steht dem eine Untersuchung gegenüber, in der es gilt, alle Erscheinungen, die unmittelbar an ein Phänomen grenzen, herauszufinden. Die Analyse der zunächst aus den Phänomenen folgenden Erscheinungen steht im Zentrum, nicht, was sich in analoger Weise auf sie bezieht. Es geht um die „Vermannigfaltigung eines jeden einzelnen Versuches“, um die vollständige Durchmusterung des sinnlich gegebenen Konkreten. Auf Grundlage der sinnlich sich entfaltenden Wahrnehmungskonstitution entwickelt sich das Naturverständnis, in welchem mit mathematischer Konsequenz die eine Erscheinung an die nächste sich reiht, ja, aus der einen die nächste gefolgert wird.

GOETHEs zentrale Erfahrung im Rahmen seiner Arbeiten zur Farbenlehre trat nun dahingehend auf, dass seine dort durchgeführte Ordnung von Phänomenen, seine Entwicklung von Erscheinungsreihen, bei denen ein Versuch unmittelbar an den nächsten grenzt, schließlich sich wie in einem Versuch zusammenfassen ließen, nur einen Versuch ausmachten. Die Fülle der durchlaufenen Versuchsreihen zeigte sich als mannigfaltigste Ansicht *einer* Erfahrung. Eine solche Erfahrung nennt Goethe eine „Erfahrung von einer höhern Art“, in der Farbenlehre selbst bezeichnet er sie als Urphänomen.

Die Erfahrungen von einer höhern Art lassen sich durch „kurze und fassliche Sätze aussprechen“ und nebeneinander stellen. Sie lassen sich zusammenstellen und ordnen, ihr Wert ist dem Wert und Charakter mathematischer Sätze vergleichbar. Sie bilden das Zentrum der Urteilsbildung, auf ihnen fußt der Erklärungsweg. Sie herauszuarbeiten ist Ziel der Erkenntnisunternehmung.

Aus dem Dialog mit SCHILLER entstand 1798 der Aufsatz „Erfahrung und Wissenschaft“ (GOETHE 1966, Bd. 13), in welchem GOETHE nochmals, fast schlagwortartig, seine Methodik zusammenfasst. Sein Ziel ist es, sich den „Gegenständen in ihrer Allgemeinheit am meisten (zu) nähern“, sich ihnen „auf eine rationelle Weise gleichsam (zu) amalgamieren“. Dazu wird die Bestimmtheit der Phänomene „anerkannt und durch den menschlichen Geist wieder bestimmt“, indem man nach Bedingungen fragt, unter welchen die Phänomene erscheinen. Der Hypothese kommt eine mittelbare Funktion zu, um die Bedingungen des Erscheinens zu finden. Empirischen Brüchen wird durch die Idealisierung eines reinen, konstanten Phänomens begegnet.

Damit ergibt sich ein dreistufiges Vorgehen: An das *empirische Phänomen* als direkte, vorwissenschaftliche Wahrnehmung einer Erscheinung schließt sich das *wissenschaftliche Phänomen* an. Dort werden Versuchsreihen geordnet gemäß den Bedingungen ihres Erscheinens. Dem folgt als höchste Stufe das *reine Phänomen*. Es ist das Resultat aller Erfahrungen und dabei selbst Erfahrung. Es ergibt sich aus „einer stetigen Folge der Erscheinungen“. Es beinhaltet sämtliche Aspekte, die oben als Ziel der GOETHESCHEN Erkenntnisunternehmung genannt wurden.

SCHILLER hat in seinem Brief vom 19. Januar 1798 an GOETHE diese drei Stufen von Phänomenen an den drei Hauptpunkten der KANTISCHEN Kategorien, Qualität, Relation und Modalität, gemessen (STAIGER 1977). An die Stelle des empirischen, wissenschaftlichen und reinen Phänomens treten bei ihm der gemeine Empirismus, der Rationalismus und der rationelle Empirismus. Aus seiner Analyse sollen, mit Hinblick auf die weiteren Ausführungen, lediglich einige wenige Gesichtspunkte referiert werden.

Der Qualität des Rationalismus ist es eigen, zu vergleichen und zu unterscheiden. Er stellt den einzigen Weg zur Wissenschaft dar, muss aber einen „Despotism der Denkkräfte“ dahingehend führen, dass Härte der Unterscheidungen und Willkür der Verbindungen vermieden werden. Gleichzeitig ist aber die Modalität des Rationalismus, „die Wirklichkeit (zu verlassen) ohne die Notwendigkeit zu erreichen“, ein wesentliches Durchgangsstadium, gibt es doch nur durch das Mögliche „von dem Wirklichen einen Durchgang zum Notwendigen“. Dieser Weg geht aus der Relation des Rationalismus hervor, nach der Kausalität der Erscheinungen zu fragen. SCHILLER spricht sich dabei, besonders auf dem Hintergrund der Modalität des Rationalismus, nachdrücklich für die Freiheit „der theoretischen Kräfte im Felde der Physik“ aus.

Im rationellen Empirismus wird nun die „vollkommene Wirksamkeit der freien Denkkräfte mit der reinsten und ausgebreitetsten Wirksamkeit (des) sinnlichen Wahrnehmungsvermögen(s) zu einer wissenschaftlichen Erkenntnis“ geführt. Dabei wird der Rationalismus der Qualität nach zum rationellen Empirismus, wenn er sich begrenzt und nicht voreilig positioniert. Der Relation nach werden dann sowohl die Kausalität als auch die Unabhängigkeit der Erscheinungen geachtet und Reduktionen vermieden. Der Modalität nach gelingt der Durchbruch zur Notwendigkeit. Die dem Rationalismus entsprechende Verstandesleistung steigert sich nach Maßgabe der Empirie. Die Empirie ist durch menschliche Verstandesleistung durchgearbeitet und bestimmt worden.

Didaktische Folgerungen

GOETHE und SCHILLER umreißen hier den methodischen Rahmen einer phänomenologischen Erkenntnisbildung. Dabei arbeiten sie mehrmals die psychologische Seite der beobachtenden Persönlichkeit heraus wie sie auch die Stellung dieser Persönlichkeit zur Natur thematisieren. Ihre Methodik mündet schließlich in einen rationalen Empirismus und begründet darüber ein Naturverhältnis.

Unter didaktischen Gesichtspunkten erweisen sich ihre Ausführungen als interessant, weil eine solche Beschäftigung mit der Physik

- zur Schulung einer Beobachtungsdisposition,
- zur Schulung einer Urteilsdisposition
- und zur Ausbildung einer sinnlichen Referenz

führen. Der Physikunterricht wird hier anthropologisch und über kulturelle Bedürfnisse besonders legitimiert.

In welchem Rahmen die Schulung der Beobachtungsdisposition stattfinden kann, haben WAGENSCHNEIDER und viele andere Autoren im Rekurs auf GOETHE bereits ausgeführt. Dem Beobachtungsprozess und der sich darin entwickelnden Beobachtungsdisposition wurde bereits ein gesondertes Kapitel gewidmet (Kapitel 2.2). Dies soll hier nicht weiter ausgeführt werden. Lediglich als methodischer Hinweis sei angefügt, dass die umrissene Beobachtungsdisposition besonders gut im Unterricht erreicht werden kann, wenn das Experiment möglichst selbsterklärend aufgebaut ist und von der Lehrerin oder dem Lehrer lediglich Fragen gestellt werden, die zur eigenen Beobachtung anregen. Dies können Fragen sein wie: „Was siehst Du?“ - „Kannst Du das auch sehen?“ oder „Ist dieser Aufbau so sinnvoll?“. Dabei wird von den Schülerinnen und Schülern nur verlangt, sich in den Aufbau einzufinden. Große Bezüge kommen zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Sprache. Die Lehrerin oder der Lehrer führen fast ohne Erläuterungen den Versuch durch und fördern so dessen sinnliche Rezeption.

Das sinnlich Rezipierte bildet den Ausgangspunkt der Erkenntnistätigkeit und bleibt im Rahmen des rationalen Empirismus stets dessen Referenz.

Die Schulung der Urteilsdisposition, wie sie im Rahmen des rationalen Empirismus gefasst wird, strebt an, in Erscheinungsreihen selbst die Ordnung der Erscheinungen gewahr zu werden. Das intuitive Moment, in welchem ein gedanklicher Zusammenhang gefasst wird, soll

aus einer Rezeption der Erscheinungen und einem Überblick über Erscheinungsreihen auftreten. Der Zusammenhang wird ein sowohl sinnlicher als auch gedanklicher Gesamtkomplex.

Dieses Vorgehen sucht den Zusammenhang im Dialog mit den angetroffenen Erscheinungen oder, allgemeiner gesprochen, in unmittelbarer Nähe zur Natur auf. Der Zusammenhang geht aus einem dialogischen Wechselprozess mit der Natur hervor. Für Schülerinnen und Schüler, die in einem solchen Kontext die Physik kennenlernen, ist die beobachtende Persönlichkeit nicht nur jemand, der den Bauplan des Universums zu entdecken hat und ihn systematisch zu ordnen hat. Vielmehr erleben die Schülerinnen und Schüler, wie sie selbst daran beteiligt sind, im Experiment sich einen Weltzusammenhang zu schaffen oder zu konstruieren. Ihr persönlicher Anteil wird stärker erlebt, sie empfinden sich nicht nur als Beobachter einer schon fertigen Welt, die im Experiment lediglich demonstriert wird.

Der große didaktische Vorteil dieses Vorgehens kann also darin gesehen werden, dass in einem dialogischen Prozess mit der Natur zum einen die eigene Tätigkeit des Beobachters im wissenschaftlichen Erkenntnis- oder Konstruktionsprozess bemerkt wird. Zum anderen bringt dieser dialogische Prozess mit sich, dass die rationalen und kognitiven Leistungen nicht von vornherein auf eine Beherrschung der Natur angelegt sind, sondern durch die hohe beschreibende Komponente der Natur ein hoher Wert an sich zugesprochen wird. Dies mag sogar dahingehend Auswirkungen haben, dass ein Physikunterricht mit dieser Zielrichtung soziale Lernprozesse unterstützt.

Die sehr pointierte Äußerung EINSTEINS „Die Theorie bestimmt, was gemessen wird“ (BLEICHROTH 1999, S. 78) trifft auch noch hier zu, wobei die Theorie im Rahmen des rationalen Empirismus stets auf die Erfahrung selbst rekurriert. Damit fußt der Erkenntnisprozess auf einer sinnlichen Referenz, die er durch die Zusammenschau von Erscheinungsreihen und Formulierung von Bedingungsurteilen rational fasst. Dies bildet einen Bezugspunkt im Unterricht zur Modellkompetenz: Ein solcher Unterrichtsgang muss nicht erst verschiedene Modelle kontrastreich gegenüberstellen, um bewusst zu machen, dass Modelle nicht ontologisch bewertet werden dürfen. Vielmehr kann der Unterricht die pragmatischen Gesichtspunkte und das historische Umfeld der Modelle thematisieren und sie als einen Vorstellungskomplex charakterisieren, der die Freiheit im Erkenntnisprozess genutzt hat, um unter bestimmten Annahmen physikalische Abläufe rational zu ordnen. Auf dem Hintergrund einer starken sinnlichen Referenz mag es gelingen, die Anschaulichkeit der Erklärung dem Erscheinungskontext

selbst zu entnehmen und nicht durch anschauliche Modelle zusätzlich an die Erscheinungen heranzutragen. Gelingt dies, wird eine Erkenntnisdisposition gefördert, welche die beschreibenden Formulierungen, z.B. im Rahmen der Quantenmechanik, emotional akzeptieren kann, weil zuvor im Unterricht der erlebte Zusammenhang der Erscheinungen den Erklärungsrahmen bildete. Damit tritt das klassische Weltbild als Modell einer vom Beobachter unabhängigen Welt (WEIZÄCKER 2002, S. 92-95) im Unterricht nicht als alleiniger oder dominierender Erklärungsweg auf.

Epistemologische Folgerungen

Vom epistemologischen Standpunkt aus führt der rationale Empirismus bzw. die Ordnung von Erscheinungsreihen im Sinne GOETHES zu einer unmittelbaren Verbindung von Subjekt und Objekt. In der Trias Subjekt - Methode - Objekt ist es die Methode selbst, welche Subjekt und Objekt zu einer Einheit werden lässt. Es wird durch die Methode die Natur nicht dahingehend vorstrukturiert, dass sie die Natur oder die Welt mit ihren Objekten als Ursache und die Erfahrung als Folge fasst. Positionen des Realismus kommen ebenso wenig zum Zuge wie Positionen eines klassischen Konstruktivismus, der den Schwerpunkt rein auf die konstruierende Tätigkeit des Beobachters legt.

Vielmehr wird ein charakterisierendes, Bezüge in ganzheitlichem Rahmen aufsuchendes Denken gepflegt, das auf die angetroffene Situation eingeht und sich damit auch Umstrukturierungen oder Abwandlungen öffnet, wenn neue Erfahrungen hinzutreten. Dies macht keine Positionierung im Sinne des Realismus oder Konstruktivismus erforderlich, auch wenn nach beiden Richtungen hin Bezüge vorliegen. Im Sinne VARELAS, für den Kognition das „Hervorbringen einer Welt“, „verkörpertes Handeln“ ist (PÖRKSEN 2002, S. 115), liegen hier Kognitionsprozesse vor, in die der Mensch als Natur, die Erfahrungen des Menschen in der Natur und seine Selbsterfahrung im Umgang mit der Natur einfließen (BÖHME 1993, S. 150). Inwiefern die mit dem rationalen Empirismus einhergehende Weltanschauung einer Begründung in sich selbst fähig ist, hat STEINER ausgearbeitet (STEINER 1984).

Die in TIMSS/III untersuchten Auswirkungen epistemologischer Überzeugungen auf die Lernprozesse und Motivation im Physikunterricht (BAUMERT 2000, S. 267-269) haben gezeigt, wie eine realistische - d.h. im Sinne des Realismus vorgehende - und schematische Physikkonzeption auf das Fachverständnis negative Auswirkungen hat. Diese Auswirkungen wer-

den teils über das Interesse, teils über die Lernstrategie vermittelt. Hinter der realistischen und schematischen Physikkonzeption steht ein traditionell-empiristisches Wissenschaftsbild. In diesem Wissenschaftsbild entdeckt die forschende Persönlichkeit stufenweise den Bauplan des Universums, den sie systematisch in Gesetze fasst. Physik wird zur Entdeckungsleistung einer an sich existierenden Welt - das Modell einer an sich existierenden Welt im Rahmen der klassischen Physik liegt so auf der Hand.

Die dem in dieser Arbeit vorgestellten Curriculum zugrunde liegende epistemologische Überzeugung ist, wie oben charakterisiert, eine andere. Sie geht darauf zu, der Erfahrung selbst zu entnehmen, wie der Mensch in der Natur steht (BUCK 1994).

2.3.2 Erweiterung des phänomenologischen Ansatzes GOETHES

Der phänomenologische Ansatz GOETHES strebt eine physikalische Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen an. Es gilt, eine solche Ordnung im Kreis der Phänomene selbst zu finden, dass das einzelne Phänomen in einem durch und durch sinnlichen Rahmen steht und dadurch einleuchtend erscheint. Die zu Beginn dieses Kapitels abgewandelte Äußerung FEYNMANS trifft in einem sinnlichen Kontext voll auf die Phänomenologie GOETHES zu. - Im Rahmen dieser Dissertation wird dieser Ansatzpunkt aufgegriffen, die Ordnung von Erscheinungsreihen geht aber noch darüber hinaus, indem sie geometrische Elemente mit aufnimmt und damit die Brücke zur formaleren Vorgehensweise der Physik schlägt. Das wird im Folgenden zu erläutern sein.

Im Rahmen optischer Versuchsreihen können neben der erhellenden Sonne bzw. Lampe undurchsichtige, konturierte Gegenstände den Erscheinungszusammenhang bestimmen: Die Kanten undurchsichtiger Gegenstände führen in Abhängigkeit der Lampenform zu mehr oder weniger deutlich ausgeprägten Schattengrenzen, die gegenseitige Verdeckung von Gegenständen im Gesichtsfeld definieren die Grenzen möglicher Sichtverbindungen. Schon einfachste optische Versuche zeigen damit Grenzwege oder Grenzlinien, die aus dem Ensemble des Versuchsaufbaus notwendig hervorgehen. Über solche Grenzwege oder Grenzlinien ist der Erscheinungszusammenhang zu ordnen, ohne dass diesen Ordnungselementen eine verursachende Dimension, wie beispielsweise im Rahmen des Strahlenmodells, zugesprochen wer-

den muss. Vielmehr werden diese Grenzwege zu Ordnungselementen, die sich durch geordnete Beobachtungshandlungen bestimmen lassen.

In diesem Sinne gefasste geometrische Ordnungselemente werden immer wieder bei der Ordnung der Erscheinungsreihen zum Tragen kommen. Sie beziehen die räumlich wirksamen Bedingungen auf die räumliche Konfiguration der Erscheinungen. Sie sind den Erscheinungen selbst immanent und werden nicht in den Kontext eines anschaulichen Modells gestellt. Das Konzept optischer Wege wird sich als eine Möglichkeit zeigen, den Erscheinungen immanente geometrische Bezüge zu formulieren.

Treten durch die Versuchsdurchführung weitere, nicht nur stufenweise veränderliche Variablen auf, wie beispielsweise die Helligkeit (Intensität) bei entsprechender Auflösung des Kontrastes, so kann der Intensitätsverlauf ebenfalls durch geometrische Ordnungselemente gefasst werden. So ist der Zeigerformalismus bei Beugungsversuchen in einem weiten Kontext tragfähig. - Hier steht aber das geometrische Ordnungselement in einer prinzipiell anderen Beziehung zum Erscheinungszusammenhang als in obigem Beispiel zur Schattengrenze: Dort wurde die Geometrie des Versuches durch ein ebenfalls geometrisches Ordnungselement geordnet; Bedingung, Erscheinung und Ordnungselement waren gleichen Typs. Hier wird die Abmilderung von Kontrast abstrakt als Helligkeits- bzw. Intensitätsverlauf gefasst. Es löst sich gerade die geometrisch zu fassende Kontur auf, sie lässt sich aber im Zeigerformalismus noch über ein geometrisches Ordnungselement fassen. Mit anderen Worten: das Ordnungselement selbst ist nicht mehr gleichen Typs wie die Erscheinung. Seine Anwendung wird abstrakt, es ist nicht mehr unmittelbar, sondern nur noch mittelbar den Erscheinungen immanent.

Bei einem solchen Vorgehen wird die Erscheinungsreihe unter dem Gesichtspunkt der Theoriebildung geordnet. Abstrakte Ordnungselemente gehen deutlich über einen rein sinnlich gegebenen Kontext heraus. Dieser methodische Schritt kann eindrucksvoll erlebt werden und Methodenbewusstsein schaffen, wenn zuvor die Erscheinungsordnung im Sinne der Phänomenologie GOETHES und im rein geometrischen Kontext geübt wurden. Im Rahmen dieser Ausführungen wird die Beugung deshalb zunächst am Gitter behandelt und mit den dort auftretenden scharfen Kontrasten die Ordnung der Erscheinungsreihen im geometrischen und sinnlichen Kontext belassen, um danach am Doppelspalt den Übergang zu abstrakten Ordnungselementen und dann zur Quantentheorie zu formulieren.

Wie zuvor erläutert, bildet eine sinnliche Referenz den Rahmen für eine Schulung des Methodenbewusstseins. Bevor der Übergang zur Quantentheorie thematisiert wird, gilt es, eine solche Ordnung im Kreis der Phänomene selbst zu finden, dass das einzelne Phänomen in einem durch und durch sinnlichen Rahmen steht und seine räumlich wirksamen Bedingungen auf die räumliche Konfiguration seiner Erscheinung geometrisch bezogen wird. Dadurch erscheint es einleuchtend.

2.3.3 Vergleich mit der Theorie- und Modellbildung

Bei physikalischen Untersuchungen, die von vorne herein auf eine Erscheinungsordnung durch Theorie- und Modellbildung zugehen, nimmt das Experiment eine andere Stellung als im Rahmen einer auf GOETHE rekurrierenden Phänomenologie ein: es wird unter Anwendung bestimmter Hypothesen zunächst idealisiert und auf bestimmte Annahmen reduziert. Der Festkörper wird zum starren Körper, die Lichtquelle punktförmig oder, indem man über die reine Idealisierung hinausgeht, wird Licht als Strahl, Welle oder Teilchen angesehen. Die Hypothesen, welche so aufgestellt werden, sind dann an weiteren Experimenten zu prüfen. Was „denknotwendige Folge“ der Hypothesenbildung ist, muss im Einklang mit den „naturnotwendigen Folgen“ im Ablauf der Experimente stehen (HERTZ, zitiert nach KUHN 2000, S.45). Die denknotwendigen Folgen der Hypothesenbildung gehen auf die aufgestellten Hypothesen zurück. Was anfänglich als Hypothese formuliert wurde, bestimmt den Inhalt aller abgeleiteten Folgen. Damit wird auch der entstehende begrifflich-kausale Vorstellungskomplex in seiner kausalen Struktur vor allem durch die am Anfang stehenden Hypothesen bestimmt. Kommt es zur einer Ausrichtung der Hypothesenbildung hin auf anschauliche Modelle, so finden sich die anfangs formulierten anschaulichen Annahmen im nun sich zum Modell entwickelnden Vorstellungskomplex überall wieder. Gerade dadurch behält das Modell seine Anschaulichkeit. Wie finden die Schülerinnen und Schüler nun aber genau die kausalen Strukturen, die dem Modell innewohnen? - Dieser Frage soll anhand des Strahlenmodells des Lichtes nachgegangen werden.

Das Strahlenmodell tritt im Anfangsunterricht zur Optik auf, um geradlinige Sichtverbindungen, den Verlauf von Schattengrenzen und die Erscheinungen sowohl am Spiegel als auch an den Grenzflächen unterschiedlicher durchsichtiger Stoffe zu erklären. Behandelt man bei-

spielsweise die geradlinige Sichtverbindung, so kann man von der Beobachtung ausgehen, dass sich die Kanten undurchsichtiger Gegenstände bei leichten Bewegungen des Kopfes genau dann zeitgleich verdecken, wenn sie in einer Flucht stehen. In einem nächsten Schritt ist es anschließend möglich, die Flucht als geometrische Idee zu fassen, hier in Form einer Halbgeraden. Diese Halbgerade könnte man, wie oben erläutert, lediglich dazu verwenden, um die Erscheinungen zu ordnen und das Phänomen in leicht idealisierter Weise rein auszusprechen - z. B. in Form des Satzes: „Sichtverbindungen verlaufen geradlinig“. Dann wäre man im Rahmen des Beobachtbaren geblieben und hätte eine Beobachtung idealisiert formuliert¹. - Im Strahlenmodell ordnet man zusätzlich der geometrischen Idee des Strahls etwas grundsätzlich Neues zu: die Potenz, die Erscheinung hervorzubringen. Es gibt geradlinige Sichtverbindungen, *weil* das Licht sich geradlinig ausbreitet. Die Schattengrenze des Kernschattens zum Halbschatten verläuft geradlinig, *weil* in das Kernschattengebiet keine Lichtstrahlen mehr fallen.

Der Mechanik entnommene Begriffe, wie die gleichförmige Bewegung, werden mit der Idee der Halbgeraden oder des Strahls zusammengefasst. Man bildet einen Vorstellungskomplex zur Erklärung *optischer* Erscheinungen, in den Erfahrungen eines ganz anderen Seinsbereiches einfließen, nämlich der *Mechanik*. Mechanische Begriffe werden implizit mit dem Begriff des Lichtstrahls mitgedacht. Damit finden die Schülerinnen und Schüler die Kausalität, die dem Strahlenmodell innewohnt, indem sie sich auf mechanische Erfahrungen - mehr oder weniger bewusst - beziehen und die in der Mechanik erfahrenen Notwendigkeiten als denknwendige Folge fassen, die der naturnotwendigen Folge im optischen Kontext entspricht. Der stets zu Grunde gelegte Strahl entzieht sich der Beobachtung; d.h. aus dem, wie hier seine Bedeutung innerhalb des Vorstellungskomplexes charakterisiert wurde, ergibt sich unmittelbar, dass er keine Observable darstellt.

DAHLMANN hat ausführlich gezeigt (DAHLMANN 1998), wie die Attraktivität solcher mechanisch-materieller Bilder nicht zuletzt darauf zurückgeht, dass mechanische Zusammenhänge unmittelbar an eigenen Körpererfahrungen erfasst werden und diese Körpererfahrungen in ihrer Unmittelbarkeit dann in andere Erfahrungsbereiche hinein getragen werden, wo der me-

¹ Bei dem hier vorgestellten Vorgehen darf man im Unterricht die Gerade nicht operational über das Aufstellen von Fluchten definieren. Vielmehr wird, wie in der Schule meist üblich, die Gerade als eine räumliche Grundgröße unterstellt. Prinzipiell ist aber eine andere operationale Definition, z. B. über technische Operationen, wie sie H. DINGLER entwickelt hat, denkbar (DINGLER 2004).

chanische Kontext aber nur parallel *neben* der unmittelbar sinnlichen Erscheinung steht. Modelle wie das Strahlenmodell des Lichtes leiten ihre Kausalität also nicht aus der Unmittelbarkeit der Erscheinung ab, vielmehr bildet ihr begrifflich-kausales Konstrukt eine Parallelexistenz zur Kausalität, die dem naturnotwendigen Ablauf eingeschrieben ist. KÜBLBECK und MÜLLER sprechen sogar von einer Kluft, die sich hier in der Modellbildung zwischen dem Modell und der Wirklichkeit auftut (KÜBLBECK, MÜLLER 2002, S. 13). Die Strahlen selbst stellen keine beobachtbare physikalische Größe dar, sie sind keine Observable. Die Hypothesenbildung bezieht insofern Elemente ein, die nicht nur zufällig, sondern prinzipiell der Erfahrung unzugänglich sind.

In der oben bereits zitierten Wortwahl WAGENSCHAINS bzw. KANTS ist das „Verhör-Reglement“, mit dem man die Natur als „bestallter Richter“ im Zeugenstand befragt, durch die Grundfrage bestimmt, inwiefern sich optische Erscheinungen durch die mechanischen Kategorien des Strahlenmodells fassen lassen - und die Antwort der Natur lautet: für die Schattenercheinungen, die Erscheinungen am Spiegel und für die Verschiebung von Ansichten beim Durchblick durch die Grenzflächen unterschiedlicher optischer Medien ist dies in geschlossener Form möglich. Dabei steht der Vorstellungskomplex, welchen das untersuchende Subjekt als anschauliches Modell bildet, in seiner Parallelexistenz zur Erscheinung neben der Natur.

Auf dem Hintergrund der Umwälzungen in der Physik durch die Entwicklung der Quantentheorie zu Beginn des 20. Jahrhunderts ist die didaktische Bedeutung anschaulicher Modelle anders zu bewerten als in einer Zeit, in der das Weltbild der klassischen Physik den Wissenschaftshorizont bildete. Insofern werden oben Modelle von HERTZ auf eine Art charakterisiert, die das physikalische Verständnis stark an das Weltbild der klassischen Physik bindet. Heute muss aber deutlich in Betracht gezogen werden, dass auf dem Hintergrund der Quantentheorie auch mathematische Formalismen einen zentralen und integralen Bestandteil im physikalischen Verständnisprozess darstellen, der nicht mehr anschaulich, sondern vielmehr abstrakt ist. Die lernpsychologisch durch ihre Anschaulichkeit vorteilhaften Modelle können sich dann für den heutigen Wissenschaftshorizont als hinderlich erweisen, da sie möglicherweise den Übergang zur Abstraktion erschweren. VOLLMER formuliert: „Für Physik-Verstehen ist Anschauung weder notwendig noch hinreichend“ (VOLLMER, zitiert nach BLEICHROTH 1999,

S. 82). Wird viel Unterrichtszeit darauf verwendet, durch anschauliche Modelle Erscheinungen zu erklären, fehlt diese Unterrichtszeit nicht nur am Ende der Schulzeit, um die Umwälzungen der Quantenphysik zu behandeln. Vielmehr haben die anschaulichen Modelle oft durch die häufige Anwendung dieses Erklärungsweges bereits eine ontologische Dimension bekommen, wie auch eine Schülerin oder ein Schüler schwer einsehen kann, warum etwas nicht real sein soll, auf das so viel Unterrichtszeit verwendet wurde. Die Tatsache der Unterrichtsgestaltung unterstützt hier auf der emotionalen Ebene eine ontologische Bewertung der Modelle (BADER 1996 und 2000). - Die Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie stellt so einen anderen Weg zur Quantenphysik dar, der sich weniger über Kontraste zu einem Weltbild der klassischen Physik bestimmt und der dargestellten, oft nur halb-bewussten ontologischen Positionierung entgegenarbeitet.

Unter einem epistemologischen Aspekt unterstützen Modelle das traditionell-empiristische Wissenschaftsbild, wenn sie als vereinfachte Repräsentanten der Realität, d.h. als eine bildhafte oder schematische begriffliche Repräsentation eines realen physikalischen Objektes oder Vorganges gefasst werden (BLEICHROTH 1999, S. 81). Damit festigen sie das oft angetroffene Präkonzept eines Dualismus von Subjekt und Objekt; die Konstruktionsleistung des Menschen im Erkenntnisprozess wird auf einen reinen Abbildungsprozess reduziert. Die Trias Subjekt - Methode - Objekt führt durch die Methode der Modellbildung eine Subjekt-Objekt-Trennung in besonderem Maße herbei. Inwieweit die Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie diese Trennung vermeidet, wurde bereits ausgeführt.

Als wesentlicher Vorteil der Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie - zusammen mit den im vorigen Kapitel ausgeführten Erweiterungen - mag angesehen werden, dass sie eine Urteilsdisposition fördert, die ohne eine ontologische Bewertung von Modellen auskommt: Durch den Rekurs auf die Erscheinungen selbst kann die technische oder historische Bedeutung von Modellstrukturen als solche erkannt werden. Des weiteren wird die Anschaulichkeit den Erscheinungen selbst entnommen und nicht, wie beispielsweise bei Modellen in der Optik, die Anschaulichkeit eines physikalischen Gebietes (dem mechanischer Erscheinungen) einem anderen physikalischen Gebiet (dem optischer Erscheinungen) zugeordnet. Dadurch bereitet der Unterricht dann den beschreibenden Ansatz der Quantentheorie vor.

2.4 Zusammenfassung der didaktischen und pädagogischen Leitziele

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Erscheinungsordnung im Kontext der Phänomenologie charakterisiert. Dabei zeigte es sich, dass sich in diesem methodischen Rahmen die Trias Subjekt - Methode - Objekt zu einem einheitlichen Ganzen ausbildet. Die Erweiterung hin zur Formulierung immanenter Ordnungselemente schlägt dann die Brücke zu einer mathematisch-geometrischen Behandlung der Erscheinungen. Abstrakte Konzepte der Physik schließen sich ohne methodischen Bruch an, wenngleich der Übergang vom sinnlich Konkreten zum abstrakt Formalen im Lernprozess deutlich wird.

In dieser Arbeit wird nun angestrebt, für einige Themen der Beugung die Fachinhalte und Fachmethoden im Rekurs auf eine sinnliche Referenz einerseits und auf den Erscheinungen immanente Ordnungselemente andererseits zu entwickeln (*Abb. 1*).

Die sinnliche Referenz bildet sich aus, wenn es sowohl gelingt, die Beobachtung als einen dialogischen Wechselprozess zu führen, als auch die Erscheinungen im Rekurs auf die Beobachtungen selbst zu ordnen. Auf Grundlage des rationellen Empirismus formt sich das Fun-

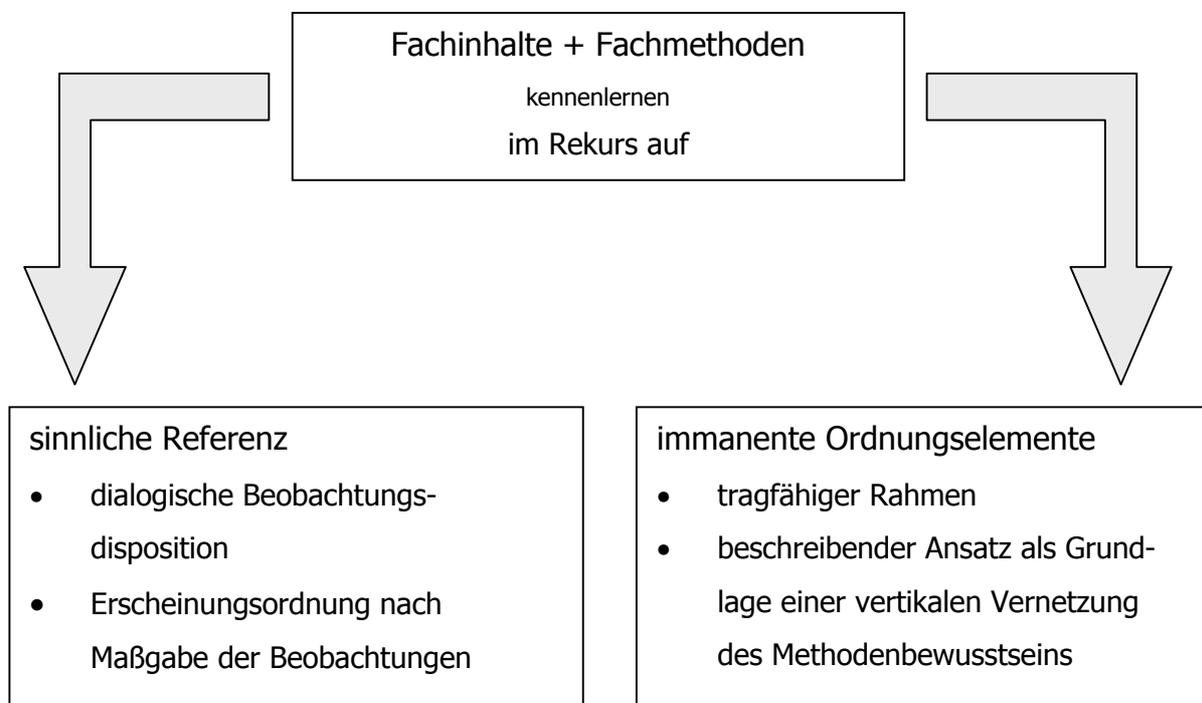


Abb. 1:

Zusammenfassung der didaktischen und pädagogischen Leitziele

dament einer Erfahrungserkenntnis.

Die immanenten Ordnungselemente fassen unter geometrischen und schließlich formalen Aspekten viele Erscheinungen zusammen; sie bilden einen tragfähigen Rahmen und sind auf kumulative Lernprozesse hin angelegt (WEBER 2003). Trotzdem bleiben sie ein beschreibender Ansatz. Über diesen beschreibenden Ansatz wird das Methodenbewusstsein vertikal vernetzt.

3 Das Konzept optischer Wege in seinem didaktischen Bezug zur phänomenologischen Optik und zum Lichtwegkonzept

Dem vorangegangenen Kapitel ist zu entnehmen, wie die Ordnung von Erscheinungsreihen als eine methodisch vorgehende Erkenntnisunternehmung auf GOETHES naturwissenschaftliche Arbeiten Bezug nimmt. Das Konzept optischer Wege greift damit insbesondere unter methodischen Gesichtspunkten GOETHES Farbenlehre auf (Goethe 1966, Bd. 13). Neben dieser methodischen Verknüpfung zu GOETHES Ausarbeitung einer phänomenologischen Optik können zahlreiche weitere Bezüge zu Arbeiten anderer Autoren im Rahmen der phänomenologischen Optik gefunden werden.

BERKLEY (BERKLEY 1912) beispielsweise analysiert in seinen Arbeiten zu Beginn des 18. Jahrhunderts das Entfernungssehen und unterscheidet dort die Wahrnehmungsinhalte in Elemente, die auf den Sehsinn und Elemente, die auf den Tastsinn zurückgehen. Damit werden die geometrischen Elemente, über die das perspektivische Entfernungssehen dargestellt werden mag, zu Elementen, die auf Tasterfahrungen rekurrieren. An die Stelle des Strahlenmodells tritt eine Betrachtung, welche die Konstruktionsleistung des Menschen im Aufbau seiner Wahrnehmungsinhalte durch die Kohärenz verschiedener sinnlicher Eindrücke, hier: des Seh- und Tastsinns, in den Fokus nimmt. - Der phänomenologische Standpunkt dieser optischen Untersuchung liegt unmittelbar auf der Hand.

Die prinzipielle Unterscheidung zwischen Seh- und Tastdingen und die damit mögliche phänomenologische Positionierung haben zahlreiche andere Autoren aufgegriffen. In den letzten Jahren waren es im Umfeld der Waldorfpädagogik vor allem JULIUS (JULIUS 1984), MACKENSEN (MACKENSEN 1992), MAIER (MAIER 1993) und OHLENDORF (MACKENSEN 1998). Im universitären Rahmen haben vergleichbare Standpunkte ERB (ERB 1994), GREBE-ELLIS (GREBE 2001a, GREBE 2001b, GREBE-ELLIS 2002), SCHÖN (SCHÖN 1994), WEBER (WEBER 2003) und WERNER (WERNER 2000) verfolgt. Da die vorliegende Arbeit auf die Entwicklung eines Curriculums abzielt, das die Beugung im Konzept optischer Wege phänomenologisch beschreibt, soll an dieser Stelle nur der Bezug zu didaktischen Arbeiten im Rahmen der phä-

nomenologischen Optik bzw. der phänomenologischen Optik nahestehenden Ansätzen hergestellt werden. Ein historischer Exkurs zur Entwicklung der phänomenologischen Optik wird hingegen nicht angestrebt. Im Folgenden greift ein Kapitel das Lichtwegkonzept von ERB und SCHÖN und ein weiteres Kapitel die phänomenologischen Ansätze von MACKENSEN, MAIER und OHLENDORF auf. Die zuletzt genannten Autoren bezeichnen ihren Ansatz als „Modellfreie Optik“ (MACKENSEN 1998) bzw. „Optik der Bilder“ (MAIER 1993).

3.1 „Modellfreie Optik“ nach MACKENSEN und OHLENDORF, „Optik der Bilder“ nach MAIER

Die Unterrichtskonzepte, welche MACKENSEN und OHLENDORF für den Physikunterricht an Waldorfschulen entwickelt haben (MACKENSEN 1992 und 1998), gehen davon aus, dass der Physikunterricht als Blockunterricht gegeben wird, und zwar meist in Blöcken zu vier Wochen. In diesen Blockzeiten haben die Schülerinnen und Schüler an vielen Waldorfschulen täglich in der Zeit von 8 Uhr bis 9.45 Uhr Physikunterricht; das Fach Physik wird in diesen Zeiten also mit etwas über zwei Unterrichtsstunden täglich berücksichtigt.

Der Physikunterricht beginnt in der Klassenstufe 6. Die Optik wird in der 6., 7. und 8. Klasse unterrichtet und am Ende der Schulzeit in der 12. Klasse wieder aufgegriffen. Dort erhält sie durch eine Blockzeit von vier Wochen ein besonderes Gewicht.

3.1.1 Zur Photometrie in der 6. und 12. Klasse

Der Einstieg in die Optik geht in der 6. Klasse von dem aus, was die Schülerinnen und Schüler unmittelbar umgibt: den Bildern der Welt, welcher sie sich sehend zuwenden (MACKENSEN 1992, S. 36). Diese „Seh-Welt“ entfaltet sich jeden Morgen mit dem Aufgang der Sonne. Dort setzen sich unterschiedliche Helligkeiten und Farbigkeiten umso mehr voneinander ab, je mehr das einheitliche Grau, in welchem während der Dämmerung die Dinge noch „verdämmern“, zu einem differenzierten Gesamtbild der erhellten Welt übergeht. In diesem Sinne entsteht die räumlich differenzierte Szenerie mit ihren klaren Konturen durch den Aufgang der Sonne. Am Morgen kommen dabei durch die langen Schatten mannigfaltige räumliche Bezü-

ge der verschiedenen Gegenstände besonders klar zur Erscheinung, während am Mittag die Dinge ohne die Verbindung der Schatten eher vereinzelt dastehen und einen mehr isolierten Eindruck machen.

Mit dem Aufgang der Sonne werden die Dinge der Welt mit hell - sie sind in diesem Sinne *mithell*, sie machen die Helligkeit der Sonne, die von sich aus hell ist, mit. Damit ist ein zentraler Begriff dieses phänomenologischen Ansatzes das *Mithelle*. Er tritt an die Stelle von Bestrahlung, einem sich ausbreitenden Lichtstrom usw.. Er wird ergänzt durch den Begriff des *Eigenhellen*. *Eigenhell* sind Körper, die von sich aus hell sind, wie die Sonne oder Lampen, und die sich mit ihrer Eigenhelligkeit gegenüber der Mithelligkeit emanzipieren (MACKENSEN, 1992, S. 39-41).

Die Schüler ordnen die gesehene Welt also, ohne dass sie ein Lichtmodell den Erscheinungen unterlegen. Dabei werden die Begriffe *mithell* und *eigenhell* aus dem unmittelbaren Wahrnehmungserleben des Sonnenaufgangs heraus in einer altersspezifischen Weise gebildet.

MACKENSEN hat dafür eine Versuchsreihe entwickelt, die in Entsprechung der Erscheinungen beim Sonnenaufgang Schritt für Schritt das Eigen- und Mithelle untersucht und bestimmt. Am Ende dieser Versuchsreihe werden im Unterricht Aussagen formuliert, wie beispielsweise:

- „Je mehr Helles über einer Fläche ist, umso heller ist sie“
- „Ist eine Lampe im Zimmer, so sind all diejenigen Stellen (mit-)hell, welche die Lampe als einen Flecken ihrer Kuppel haben“ - (Kuppel: Der sichtbare Halbraum über einer Fläche). Die Stellen sind „umso heller, je größer dieser Flecken von ihnen aus gesehen“ wird „und je näher dieser Fleck dem Zenit ihrer Kuppel steht“.

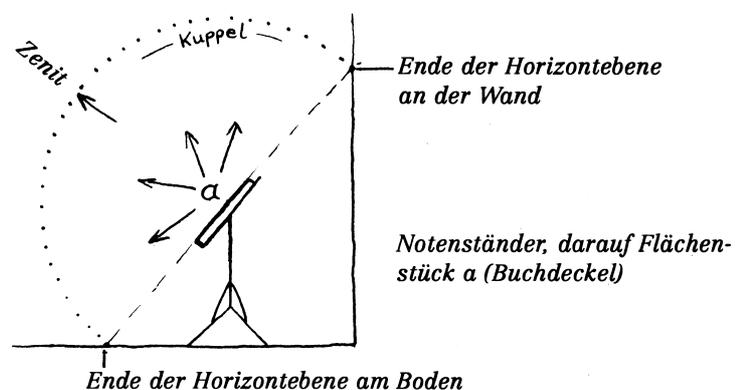


Abb. 2:

Eine beleuchtete Fläche mit ihrer Kuppel nach MACKENSEN

Den so formulierten Bedingungsurteilen merkt man sofort an, wie aus dem Sehen heraus der Zugang zur Photometrie gesucht wird. Soll die Erleuchtung oder Helligkeit einer bestimmten Fläche verstanden werden, so tritt an die Stelle der Konfiguration auftreffender Lichtstrahlen

die Frage danach, was von der entsprechenden Fläche aus alles zu sehen ist. Die Denkbewegung hat einen handlungsorientierten Ansatzpunkt und geht ausschließlich von beobachtbaren Elementen aus.

Die in der 6. Klasse eingeführten Begriffe des Eigen- und Mithellen bleiben in der 7. und 8. Klasse tragfähig, wenn in dem entsprechenden Curriculum der Spiegel und die Brechung bis hin zur Linse behandelt werden. Kurz vor dem Ende der Schulzeit, in der 12. Klasse, wird dann die Photometrie nochmals aufgegriffen und auf dem Hintergrund größerer kognitiver Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler neu geordnet (MACKENSEN 1998).

Hier mag der Unterricht, so ein Vorschlag von MACKENSEN und OHLENDORF, damit beginnen, dass durch einfache Versuche mit dem RICHIE-Photometer das sogenannte LAMBERTSCHE Entfernungsgesetz für die Beleuchtungsstärke E_i einer Lampe im Abstand r_i entwickelt wird.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Die Erklärung setzt wieder von dem Sehen ausgehend an. Das perspektivische Entfernungsehen wird untersucht und jetzt auch geometrisch behandelt. Hierfür wird eine Kette von Lampen gleicher Bauart in äquidistanter Anordnung beobachtet, wobei die Lampen auf gleicher Höhe in einer Flucht stehen. Die Beobachterin oder der Beobachter befindet sich ebenfalls mit dem Auge in der Flucht auf Höhe der Lampen, und zwar mit einem Abstand zur ersten Lampe, der dem Abstand der verschiedenen Lampen untereinander entspricht.

Dabei fallen zwei Dinge sogleich auf: Zum einen sieht man bei gleicher Bauart der Lampen alle Lampen gleich hell, unabhängig von ihrer Entfernung zum Auge der beobachtenden Persönlichkeit, und zum anderen nimmt die zweite Lampe nur ein Viertel der Größe der ersten Lampe im Gesichtsfeld ein. Für die dritte Lampe gilt ein Neuntel usw..

Braucht man, wie es der Versuch mit dem RICHIE-Photometer ergibt, in doppelter Entfernung vier mal so viele Lampen wie in einfacher Entfernung, um die gleiche Helligkeit oder Beleuchtungsstärke zu erzielen, so folgt zusammen mit dem oben geschilderten Versuch, dass die im Gesichtsfeld gesehene Winkelgröße der Lampe die Beleuchtung bestimmt. Bei gleicher

Beleuchtungsstärke gilt:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2},$$

wobei L_i für die Anzahl der Lampen und r_i für den Abstand der Lampen zum Schirm stehen.

Liegt bei einem Versuch mit dem RICHIE-Photometer nur ein Viertel der zur Referenz herangezogenen Winkelgröße der Lampe vor, erwartet man entsprechend auch nur ein Viertel der Beleuchtungsstärke. Damit ergibt sich das LAMBERTSCHE Entfernungsgesetz.

Wieder tritt an die Stelle des Strahlenverlaufs eine Analyse der räumlichen Konfiguration gesehener Dinge. Formal ergeben sich aber sofort Analogien: Hier die identischen punktförmigen Lampen in den Abständen r_i zur beleuchteten Fläche, dort der „Punkt“ des Auges in den Abständen r_i zu den gleich hell gesehenen Lampen.

In ähnlicher Weise kann auch noch die Winkelabhängigkeit in das Gesetz eingearbeitet werden, ohne dass diese Ableitung hier referiert werden soll. Aus der Gegenüberstellung einer geometrischen Ordnung gesehener Lampenhelligkeiten über die Gesetze der Perspektive und dem Modell eines strahlenförmig sich ausbreitenden Lichtstromes (MAIER 1993, S. 116 ff.) können dann verschiedene Lernziele angegangen werden. Diese sind beispielsweise:

- eine Vertiefung des in der Mittelstufe Gelernten mittels geometrischer Methoden.
- eine Reflexion des modellfreien Ansatzes. Der Ausgangspunkt des Sehens und die geometrische Ordnung des Gesehenen werden so den Schülerinnen und Schülern bewusst.
- eine Reflexion der physikalischen Methode bei der Formulierung des Strahlenmodells.
- aus der Gegenüberstellung des modellfreien Ansatzes mit dem Strahlenmodell die Ausbildung von Modellkompetenz.

Die bisherige Wissensbasis wird damit in der 12. Klasse in hohem Maße neu strukturiert und bewertet, ohne dass sich bisherige Begriffe, Inhalte und Methoden nicht mehr als tragfähig erwiesen. Der Begriff des Mithellen z.B. bleibt weiterhin gültig, er wird allerdings auf dem Hintergrund perspektivischer Seheindrücke auch in einen geometrischen Kontext gestellt. Der methodische Ansatzpunkt, vom Sehen auszugehen, kommt ebenfalls weiterhin zum Tragen. Damit vertieft sich die Wissensbasis während ihrer Neustrukturierung - es liegt ein kumulativer Lernprozess vor (WEBER 2003).

Sowohl in der 6. als auch in der 12. Klasse können die hier vorgestellten, vom Sehen ausgehende Ansätze zur Behandlung der Photometrie auch dazu dienen, das Thema Schatten zu behandeln. Der Kernschatten wird dann als dasjenige Gebiet definiert, von dem aus die Lampe oder Sonne überhaupt nicht zu sehen ist, der Halb- oder Übergangsschatten hingegen als dasjenige Gebiet, von dem aus nur ein Teil der Lampe zu sehen ist.

Sowohl MACKENSEN, OHLENDORF (MACKENSEN 1998, S. 23 ff) und MAIER (MAIER 1993, S. 133 ff) als auch SCHÖN (SCHÖN 1997) haben hierzu umfangreiche Versuchsreihen dokumentiert und weiterentwickelt. Der Schatten als Bild der Lampe, als Bild des verdeckenden Gegenstandes, als Bild der Abstandsverhältnisse und als Bild der umgebenden Kuppel werden untersucht.

3.1.2 Zum Spiegel in der 7. und 12. Klasse

An die Photometrie in der 6. Klasse schließt sich in der 7. Klasse die Behandlung von Erscheinungen am ebenen Spiegel an. Auch diese werden in der 12. Klasse wieder aufgegriffen und – zusammen mit den Erscheinungen am Wölb- oder auch Hohlspiegel – vertieft.

Eine einschneidende Erfahrung im Zusammenhang mit den Spiegelercheinungen kann jede Beobachterin und jeder Beobachter machen, die, vielleicht von einer Brücke aus, an einem schönen Sommertag auf ein Gewässer blicken und dabei selbst im Gegenlicht stehen. Sofern eine leichte Brise weht, werden sie über einen bestimmten Bereich in Richtung der Sonne auf der Wasseroberfläche bemerken, wie es glitzert oder mehr diffus glänzt. Dabei verändern sich das Glitzern und der Glanz ständig und sie werden den Schluss ziehen, dass der Wind über das Wasser streicht und dieses zu feinen Wellen „aufwühlt“. – Hat sich der Wind beruhigt und liegt das Gewässer ruhiger da, so mögen vielleicht einige Enten hinter sich einen Keil an Wellen hervorrufen, der ihnen, sich ausweitend, folgt. Der Blick in Richtung der Sonne auf die noch ruhige Wasseroberfläche zeigt jetzt bei gesenktem Blick eine Ansicht der Sonne, die tief unter der Wasseroberfläche liegt. Dunkles Grau umgibt dort die Sonne, in hellem Grau mögen Cumulus-Wolken neben der Sonne zu sehen sein. Sobald der Wellenkeil die Ansicht verändert, „schwankt“ das Bild der Sonne und die Beobachterin und der Beobachter werden feststellen, dass sie zuvor gar nicht auf die Wasseroberfläche blickten, sondern viel mehr weit in einen Raum unter dieser Fläche und dass erst mit der Veränderung des Sonnenbildes sie konstatierten, um wie vieles höher die Wasseroberfläche liegt. - Zunächst war die Wasseroberfläche unsichtbar und in einem darunter liegenden Raum wurden Dinge erblickt, dann modifizierte sich die Ansicht dieser Dinge und die Lage der Wasseroberfläche wurde sichtbar. Am ebenen Spiegel blickt man also in einen Raum, der hinter dem Spiegel liegt, während die Spiegelfläche selbst im Anblick der Dinge dieses Raumes nicht Wahrnehmungsinhalt wird, in

diesem Sinne also unsichtbar ist. Die Spiegelansichten gehen aus dem Glitzern oder Glanz hervor, wenn die Oberfläche des Spiegels zunehmend glatt und eben wird. Der Ausdruck „Spiegelbild“, der suggeriert, auf der Oberfläche würden Bilder gesehen, muss im Sinne dieser Erscheinungsreihe dahingehend verändert werden, dass sich der Blick in einen Spiegelraum gerade dann auftut, wenn auf der Oberfläche kein Bild, d.h. keine Oberflächenstruktur, gesehen wird.

Die soeben angeführte Erscheinungsreihe wurde zum einen mit einer gewissen Ausführlichkeit entfaltet, weil MACKENSEN in seiner Unterrichtsreihe wieder vom Sehen ausgeht (MACKENSEN 1992, S. 76) und so mit dem Blick in den Spiegelraum beginnt und zum anderen, weil bei der phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege die Beugungserscheinungen in Reflexion ebenfalls beim Blick in den Spiegelraum ihren Ausgangspunkt haben. An die Stelle der diffusen Oberflächenstruktur wird dort die geordnete regelmäßige Oberflächenstruktur treten und diese Struktur wird vervielfachte Sonnen- oder Lampenansichten bedingen. Sobald am MICHELSON-Interferometer beim Blick durch den halbdurchlässigen Spiegel sich verschiedene Spiegelräume überlagern, wird es schließlich notwendig, dass man die Spiegelräume als reine Sehräume überblickt und beherrscht (Kapitel 5.3.1). – Doch nun zurück zur Behandlung der Spiegelercheinungen in der 7. Klasse.

Der Blick „durch“ den ebenen Spiegel erschließt einem also einen Raum, in dem man alle Dinge des „Diesseits“ nochmals sieht. Diese Dinge im „Jenseits“ oder im Spiegelraum verschieben sich bei Bewegungen des Kopfes, so wie man es erwartet. Auch werden sie, je weiter entfernt sie liegen, immer kleiner. Sie liegen den Dingen des Diesseits senkrecht zur Ebene des durchblickten Spiegels gegenüber.

Mit eindrucksvollen Schattenversuchen, bei denen Lampen im Spiegelraum Schatten im „Diesseits“ hervorrufen, wird dieser Zusammenhang erübt. Dabei erweist sich das Gelernte aus der Photometrie als tragfähig: sowohl die Zuwendung einer Fläche zu Lampen im Spiegelraum als auch im Diesseits bestimmen deren Helligkeit. Indem man im weiteren Gang des Unterrichtes dann Fragen analysiert, wie beispielsweise eine Beobachterin oder ein Beobachter blicken muss, um eine andere Person im Spiegelraum zu sehen, und ob dann diese Person im Diesseits auch angeschaut wird, erschließt man schließlich das Spiegelgesetz in einer der folgenden Formen:

- Die Dinge im Spiegelraum liegen den Dingen im Raum vor dem Spiegel senkrecht zur Ebene des durchblickten Spiegels gegenüber².
- Was ein vor dem Spiegel stehender Beobachter sieht, gleicht genau dem, was ein entsprechender Beobachter des Spiegelraumes im Raum vor dem Spiegel sieht.

In die zuletzt genannte Formulierung lässt sich noch die sogenannte Rechts/Links-Umkehr integrieren, was aber hier nicht referiert werden soll, da es für den weiteren Gang dieser Arbeit nicht von Belang ist.

Das hier für die 7. Klasse Vorgelegte greift das von MACKENSEN ausgearbeitete Curriculum der Waldorfschulen in der 12. Klasse wieder auf, indem nun anhand der Spiegelercheinungen anspruchsvollere Fragen diskutiert werden, welche die epistemologische Dimension der Physik verdeutlichen.

Zunächst wird das Entfernungssehen behandelt und nach perspektivischem, parallaktischem (die Verschiebung der Gegenstände gegeneinander bei Bewegungen des Kopfes) und stereoskopischem Entfernungssehen unterschieden. Am ebenen Spiegel bleiben beim Blick in den Spiegelraum diese drei Arten des Sehens unverändert – dieser Punkt wird mit den Schülerinnen und Schülern genauso besprochen wie die Tatsache, dass am ebenen Spiegel der Seh- und der Tastraum auseinanderfallen – und zwar so, dass die Dinge des Sehraumes den Dingen des Tastraumes senkrecht zur Ebene des durchblickten Spiegels gegenüber liegen.

Mit der Frage, ob der Spiegelraum real sei oder nicht, kann durch lebhaftes Unterrichtsgespräche ein Bewusstsein davon evoziert werden, dass verschiedene Sinne zu unserer räumlichen Ordnung der Welt beitragen, ihnen aber nicht immer eine Kohärenz von Seh- und Tastwahrnehmungen als unumstößliche Referenz zur Verfügung steht³. Auch wird bei dieser Diskussion sofort deutlich, dass, wenn man den Sehraum als optische Täuschung definiert, man im Tastraum alleine das Spiegelgesetz formulieren muss und damit die Formulierung über den gleichen Ein- und Ausfallswinkel sinnvoll wird.

Am Wölbspiegel schließlich fallen stereoskopische und perspektivische Entfernung auseinander. Hier kann in einem weiteren kumulativen Lernprozess deutlich werden, wie die Sinnes-

² L. C. EPSTEIN führt aus, wie für bewegte Dinge dieses Spiegelgesetz auch Impulsbetrachtungen mit einschließt: „Nach einer gewissen Zeit ... gelangte ich zu dem Schluss, dass die hinter dem Spiegel befindlichen Dinge lediglich den Versuch unternahmen, herauszutreten, jedoch von den Dingen zurückgeschubst wurden, die versuchten, selbst in den Spiegel zu gelangen. Das erklärte die Reflexion“ (EPSTEIN 1988, S. 160).

³ Kinder versuchen manchmal, die Dinge, welche sie im Spiegelraum erblicken, dadurch in die Hand zu bekommen, dass sie in den Raum hinter dem Spiegel greifen. Siehe hierzu auch die Abbildung in SIEMSEN 1997. Kinder gehen demnach wie selbstverständlich von einer Kohärenz der Seh- und Tastwahrnehmungen aus.

wahrnehmung nicht ein direkter Abbildungsvorgang der Welt auf die kognitiven Strukturen des menschlichen Bewusstseins ist, sondern vielmehr ein hoch differenzierter Konstruktionsprozess, in dem, so VARELA, der Mensch als verkörpertes und handelndes Wesen steht (PÖRKSEN 2002, S. 115). Kann der Mensch Elemente dieses Konstruktionsprozesses überblicken, so wird ihm bewusst, wie er selbst mit seiner Sinnesorganisation in der Welt steht. Er hat sich damit denkend über seine Stellung zur Welt aufgeklärt. Diese philosophische Dimension physikalischen Handelns strebt der hier referierte Ansatz exemplarisch für die 12. Klasse der Oberstufe an.

3.1.3 Zur Brechung bzw. Hebung in der 8. und 12. Klasse

In der 8. Klasse tritt als zentraler neuer Inhalt des Physikunterrichtes zur Optik der Einblick in durchsichtige Medien mit einer von der Luft unterschiedlichen Brechzahl n hinzu. Blickt man, um einen lebensweltlichen Ausgangspunkt zu nennen, von einem Standpunkt außerhalb des Wassers auf Dinge unter Wasser, so sieht man die Gegenstände unter Wasser gehoben. Die an den Erscheinungen gebildete Terminologie MACKENSENS führt entsprechend den genannten Themenkreis als Hebung und nicht als Brechung ein. Dieser Themenkreis soll hier wieder, in Anlehnung an das Vorgehen des vorigen Kapitels zum Spiegel, zunächst umrissen und dann mit seinen Schwerpunkten in der 8. und 12. Klasse dargestellt werden. Dabei kommt auch die Linse zur Sprache, sind doch die Linseneigenschaften im Rahmen von Beugungsexperimenten von zentraler Bedeutung.

Was beim Spiegel unvermittelt und mit zuweilen unheimlich anmutender Konsequenz gegeben ist, zeigt sich im Erscheinungsgebiet der Hebung auch, aber anders – als ein in seiner Stärke an vielfältige Bedingungen der beteiligten optischen Mittel gebundenes Auseinandertreten von Seh- und Tastraum. So ist die Hebung der Bodenansicht eines gefüllten Wasserglases kaum merklich. Dagegen ist man immer wieder beim Griff nach einer Münze am Grund eines Brunnentroges erstaunt, um wie viel tiefer als erwartet man greifen muss.

Ein einführender Versuch in der 8. Klasse kann sein, dass die Schülerinnen und Schüler einmal in den leeren und einmal in den wassergefüllten Eimer blicken: Sie stellen sich so auf, dass sie von dem leeren Eimer gerade nicht mehr den Boden sehen, und behalten ihre Position

während des Versuches bei. Mit dem Eingießen des Wassers erscheint der Boden in ihrem Blickfeld. - Die räumliche Stellung des Eimers hat sich nicht geändert, seine Tastrage bleibt fest. Indem Wasser eingegossen wird und man auf den Boden blickt, verschiebt sich der gesehene Ort des Bodens bezüglich dessen Tastrage. Sehraum und Tastraum sind nicht mehr identisch.

Sofern man den Versuch bei Sonnenschein so ausführt, dass die Schattengrenze des Eimerandes ohne Wasser mit der Bodengrenze an einer Stelle zusammenfällt, so kann man mit Eingießen des Wassers diese Hell-Dunkel-Grenze verschieben. Den zuvor beschatteten Boden sieht man jetzt teilweise erhellt.

Während im ersten Fall die Schülerinnen und Schüler als Beobachter unmittelbar in den Versuch eingebunden sind, indem mit zunehmendem Wasserstand der zuvor verdeckte Boden für ihren Blick nach und nach erscheint, ist im zweiten Fall ihre Beobachterrolle von der Versuchsdurchführung abgelöst; sie beobachten unabhängig von außen, wie sich eine Schattengrenze verschiebt. Versuche, deren Durchführung sich an dem zuerst beschriebenen Versuchsablauf orientieren, werden von MACKENSEN und MAIER *eingebundene* Versuche genannt, während im zweiten Fall sie von *abgelösten* Versuchen sprechen. Diesen beiden Perspektiven und insbesondere ihrem pädagogischen Stellenwert wird im Rahmen der Beugung noch ein gesondertes Kapitel zu widmen sein (Kapitel 4.3.1). In dem betrachteten Versuch können Prüfbeobachtungen den Schülerinnen und Schülern zeigen, dass die Schattengrenze auf dem Eimerboden im abgelösten Versuch mit der Sichtbegrenzung durch den oberen Eimertrand im eingebundenen Versuch zusammenfällt (GREBE-ELLIS 2002b, S. 9).

Die Blickrichtung, die der Beleuchtungsrichtung im abgelösten Versuch entspricht, ferner der Ort der Grenzfläche und ihr Abstand zu den Dingen unter Wasser bestimmen, wie stark Seh- und Tastraum auseinander gehen. Das Verhältnis von Tastrage zu Sehlage führt einen dabei auf eine Materialkonstante, die Hebungs- bzw. Brechzahl n . Die Verschiebung der Begrenzungslinien von Gegenständen unter Wasser gilt es mit weiteren Versuchen zu erfassen.

Bei waagrechtem oder senkrechtem Blick in ein Aquarium (*Versuch 1*) bemerkt man, indem man das Tischniveau oder die Lage z.B. einer Münze innerhalb und außerhalb des Aquariums vergleicht, wie die Ansicht im Aquarium immer *senkrecht zur durchblickten Grenzfläche*, d.h. zu einem hin verschoben erscheint. Der Vergleich der Gegenstände im Wasser mit den Gegenständen außerhalb beruht zum einen auf deren relativer Größe im Blickfeld. Entferntere

Gegenstände erscheinen kleiner als näher bei uns liegende (Perspektive); durch die perspektivische Größe der Gegenstände kann man die Entfernung abschätzen. Zum anderen können eine Beobachterin oder ein Beobachter durch leichte Bewegungen des Kopfes feststellen, wie sich die Gegenstände gegeneinander verschieben (Parallaxe); auch dadurch ist es ihnen möglich zu bestimmen, wann gehobene und nicht gehobene Ansichten auf gleicher Höhe sind. Durch diese Vergleiche legen sie jeweils den Ort fest, wo sie die gehobene Ansicht eines Gegenstandes im Wasser bezüglich des Tastraumes sehen.

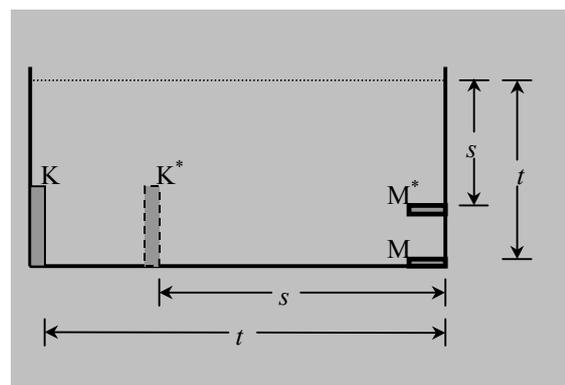
In dem beschriebenen Experiment ist der Sehweg s Teil des Tastweges t ; beide Wege sind leicht zu messen. Sie beginnen im Auge, gehen durch den Einblickspunkt der Grenzfläche und enden am ins Auge gefassten Gegenstand. Da sie für die Strecke in der Luft identisch sind, untersucht man für den Sehweg s und den Tastweg t nur die entsprechenden Streckenabschnitte im Wasser. Auch beschränkt man die Bezeichnungen s und t auf diese Streckenabschnitte. Sowohl bei waagerechtem als auch bei senkrechtem Einblick findet man für das Verhältnis $n = t/s$ ähnliche Zahlenwerte - an der Grenzfläche Luft/Wasser bei $n \approx 1,3$ (den Einfluss der Glaswand lässt man an dieser Stelle zunächst unberücksichtigt). Für den senkrechten Blick auf eine Grenzfläche Luft/Wasser, welche Lage diese Fläche im Raum auch immer hat, gilt damit: *Ein unter Wasser liegender Gegenstand wird um ein Viertel seiner Eintauchtiefe gehoben gesehen.*

MACKENSEN schlägt in seinem Curriculum vor (MACKENSEN 1992, S. 122), in der 8. Klasse den schrägen Einblick noch nicht zu untersuchen, sondern vielmehr zunächst zum Prisma und dann zur Linse überzugehen. Nach einer phänomenologischen Beschreibung, wie Ansichten beim Blick durch das Prisma verschoben werden, gelingt es ihm, davon ausgehend die Vergrößerung der Ansichten beim Blick durch eine Konvexlinse sehr elegant abzuleiten. Dies soll

V 1:

Ein Beobachter blickt waagrecht von rechts durch die senkrechte Wand eines mit Wasser gefüllten Aquariums. Er sieht den Körper K auf sich zu verschoben. Neben dem Aquarium bewegt er auf gleicher Höhe (indem er ein Brett geeigneter Dicke neben das Aquarium legt) einen gleich geformten Körper K^* so lange, bis beide Körper K und K^* auf gleicher Höhe gesehen werden. Sowohl der Tastweg t als auch der Sehweg s werden gemessen.

Beim Einblick von oben kann man Seh- und Tastwege auch mittels einer Münze (M, M^*) ausmessen.



hier in geschlossenem Rahmen im Zusammenhang mit den von ihm für die 12. Klasse vorgeschlagenen Erweiterungen referiert werden. Dort greift er zunächst die Hebung für den schrägen Einblick auf und geht dann umfassend auf die Linse ein. Für eine phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege bilden seine Unterrichtsvorschläge einen wichtigen Ausgangspunkt.

In dem oben dargestellten Versuch (*Versuch 1*) fällt die Hebungsrichtung stets mit der Blickrichtung zusammen. Bei schrägem Einblick ins Wasser ist das nicht mehr gegeben. Es gilt dann, das Verhältnis von Tastweg und Sehweg auch für den schrägen Einblick auszumessen.

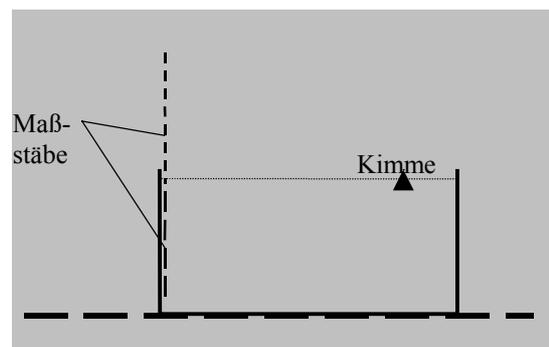
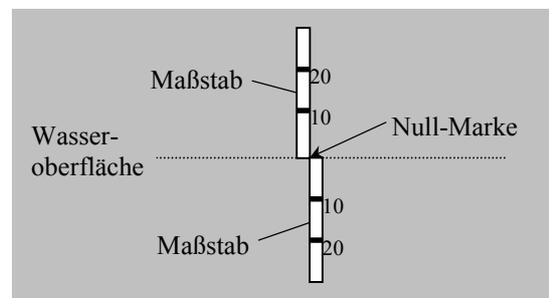
In *Versuch 2* kann man den Ort, an dem man die gehobene Markierung auf dem Maßstab im Wasser sieht, über den gespiegelten Maßstab direkt bestimmen (ALTEHAGE 1959; MAIER 1993). Den gespiegelten Maßstab erblickt man senkrecht gegenüber seiner Tastlage oberhalb der Wasseroberfläche. Liest man also beispielsweise die 20 cm-Marke des gehobenen Maßstabs bei 13 cm des gespiegelten ab, so weiß man, wo bei der gegebenen Einblicksrichtung diese Markierung bezüglich des Tastraums gesehen wird. Ferner wird sowohl die Ansicht des

V 2:

Zwei Maßstäbe montiert man gegeneinander versetzt so, dass ihre Null-Marken auf gleicher Höhe sind. Bei senkrechter Stellung nehmen die Werte des einen Maßstabes noch oben hin zu, während die Werte des anderen Maßstabes nach unten hin ansteigen. Man stellt beide Maßstäbe an einer Seite des Aquariums senkrecht auf und befestigt ihre Nullmarke auf dem Niveau der beabsichtigten Füllhöhe des Aquariums mit Wasser.

Im Wasser erblickt man den gespiegelten Maßstab und vergleicht dessen Werte mit denen des ins Wasser getauchten Maßstabes. Dabei hält man den Einblicksort durch die Kimme fest, verschiebt den Kopf aber nach oben und unten und notiert jeweils die an beiden Maßstäben abgelesenen Werte. Der Blick über die Kimme zwingt einen zur einäugigen Beobachtung.

Sofern man das Aquarium randvoll mit Wasser füllt, kann die Kimme auch durch einen gespannten Faden ersetzt werden. Um den gespiegelten Maßstab besser zu erkennen, kann man die entsprechende Stelle ggf. oberhalb der Wasseroberfläche gezielt beleuchten. Der Abstand zwischen Kimme und den Maßstäben wird ebenfalls aufgenommen.



Maßstabes als auch die der senkrechten Kanten des Aquariums durch die Hebung offensichtlich *in sich* gestaucht. Gegenstände erscheinen also *senkrecht zur durchblickten Grenzfläche* gehoben. Über eine Kimme oder Peilschnur legt man den Einblicksort auf der Wasseroberfläche fest und kann nun bei verschiedenen Einblicksrichtungen einäugig den gehobenen und gespiegelten Maßstab aufeinander beziehen. Eine andere Möglichkeit ist, immer dieselbe Markierung, z.B. den Fußpunkt des gehobenen Maßstabes, für verschiedene Kimmenabstände x_k anzupeilen. Gegebenenfalls beleuchtet man noch den Maßstab außerhalb des Aquariums, um die Spiegelansicht hervorzuheben.

Die Schülerinnen und Schüler der 12. Klasse stehen hier vor einer anspruchsvollen Herausforderung: sie sollen den Sehraum der gehobenen Ansichten zunächst mit dem Sehraum der gespiegelten Ansichten in Verbindung bringen und über das Spiegelgesetz die entsprechende Tastlage der Ansichten festlegen. Dazu müssen sie sich zunächst Klarheit über die geometrischen Verhältnisse ihrer Beobachtungen verschaffen. Ihr Auge, die Kimme und die gehobene Markierung liegen in einer Flucht. Sie bilden den Sehweg, der zum Teil in Luft, zum Teil in Wasser verläuft. Die Strecke in Wasser zwischen Einblickspunkt (Kimme) und gehobener Markierung wird in Analogie zu *Versuch 1* als Sehweg s bezeichnet. Demgegenüber bildet der Tastweg t die Strecke von der Kimme zur tastbaren Lage der Markierung des Maßstabes. Im Gegensatz zum senkrechten Einblick ins Aquarium haben nun Seh- und Tastweg nur den Ein-

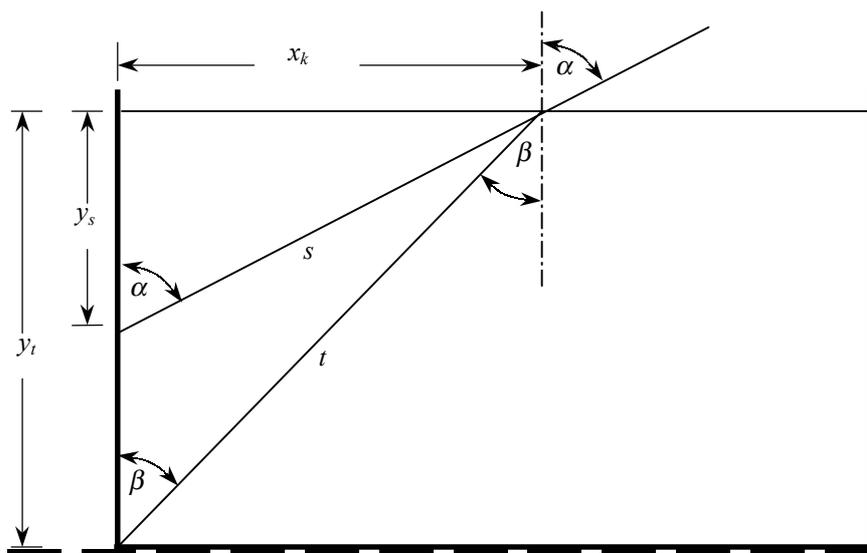


Abb. 3:
Beziehung zwischen den Richtungen und Längen der Seh- und Tastwege

blicksort gemeinsam. Je länger sie sind, d.h. je flacher der Blickwinkel ist, desto weiter laufen sie auseinander. Nur ein auf dem Tastweg sich befindender Gegenstand kann die Markierung des Maßstabes ver-

decken. Beide Wege, sowohl den Sehweg s als auch den Tastweg t , können aus den Maßen berechnet werden, die man bei verschiedenen Einblicksrichtungen ermittelt. Als zusätzliches Maß muss man lediglich die Entfernung x_k zwischen Kimme und Maßstab festhalten. Dabei stellt man fest: *Das Verhältnis von Tastweg und Sehweg t/s ist unabhängig vom Einblickswinkel und im Idealfall konstant: $n = t/s$.* Für Wasser beträgt es $n \approx 1,33$, für Fensterglas $n \approx 1,47$. Diese Stoffkonstante nennt man Hebungs- oder Brechzahl. $n = t/s$ ist formal äquivalent zu der DESCARTSCHEN Formulierung des Brechungsgesetzes (*Abb. 3*):

$$n = \frac{t}{s} = \frac{t}{x_k} \cdot \frac{x_k}{s} = \frac{x_k/s}{x_k/t} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad \text{mit } t = \sqrt{x_k^2 + y_t^2} \quad \text{und } s = \sqrt{x_k^2 + y_s^2} .$$

Es wurden hier zunächst nur räumliche Lagen von Ansichten aufeinander bezogen – und zwar in einem eingebundenen Versuch. Sobald man in einem abgelösten Versuch an die Stelle des Auges eine Lampe stellt und durch eine Abdeckung an einer Stelle des Sehweges eine Schattengrenze einführt, gibt der Tastweg den weiteren Verlauf der Schattengrenze unter Wasser an. Die Schattengrenze knickt am Übergang Luft/Wasser ab. Man kann auch sagen: Sie wird zum Lot auf die Wasseroberfläche hin gebrochen. Das Aquarium ist genau dort erhellt, wo man im eingebundenen Versuch vom Ort der Lampe aus seine Wände oder seinen Boden sieht. Das Hebungsgesetz lässt sich damit vollständig aus dem Sehen herleiten. Man kann im Unterricht bis zu dieser Stelle vom Sehen ausgehen.

Blickt man durch ein Prisma mit dem Grundriss eines rechtwinkligen Dreiecks so hindurch, dass man durch die bezüglich der Grundfläche senkrechte Fläche über der Hypotenuse und durch die entsprechende Fläche über einer Kathete hindurch schaut, so werden die dahinter stehenden Dinge in Richtung der Kante verschoben gesehen, die von den beiden Flächen über der Hypotenuse bzw. Kathete gebildet wird. Diese Kante soll im Folgenden, wie MACKENSEN es in der 8. Klasse einführt, als „ziehende Kante“ bezeichnet werden. Die Verschiebung der Ansichten in Richtung der ziehenden Kante kann direkt mit Hilfe des Hebungs- oder Brechungsgesetzes begründet werden, wobei zu dem Einblick ins Wasser der Ausblick aus dem Wasser hinzu genommen werden muss. Dies soll in einem folgenden Kapitel im Konzept optischer Wege noch folgen (Kapitel 3.3.3). Damit wird auch verständlich, dass, je größer der

Prismenwinkel an der ziehenden Kante ist, umso größer die Verschiebung der Ansichten wird, wie auch, dass die Verschiebung der Ansichten zunimmt, wenn sich die angeblickten Gegenstände weiter hinter dem Prisma befinden.

Indem nun gemäß *Abbildung 4* eine angeblickte Person hinter einem Doppelprisma bei verschiedenen Abständen zum Doppelprisma verfolgt wird, kann die Vergrößerung der Ansichten beim Durchblick durch Konvexlinsen vorbereitet werden: die Ansichten verschieben sich in Richtung der entsprechenden ziehenden Kanten, ohne dass sie in beachtlichen Ausmaßen ihre Größe verändern. Es wirkt zwar so, als ob die angeblickte Person zunächst einen breiteren Rumpf bekäme, die zunehmende Verdopplung der Gesichtszüge weist aber darauf hin, dass es sich hier nicht um eine Vergrößerung im engeren Sinne handelt.

Eine Vergrößerung im engeren Sinne bedeutet eine Veränderung der Ansicht, so dass die spätere Ansicht aus der ursprünglichen durch eine zentrische Streckung hervorgeht. Ersetzt man jede Seite des Doppelprismas durch zwei Teilprismen unterschiedlichen Prismenwinkels und fügt man dazwischen noch ein planparalleles Stück ein (*Abb. 5*), so werden die Dinge hinter dem planparallelen Stück – bei c - nicht oder nur unwesentlich verschoben sein (1. Stufe), die Dinge hinter dem daran anschließenden Stück – bei d - etwas verschoben sein (2. Stufe).

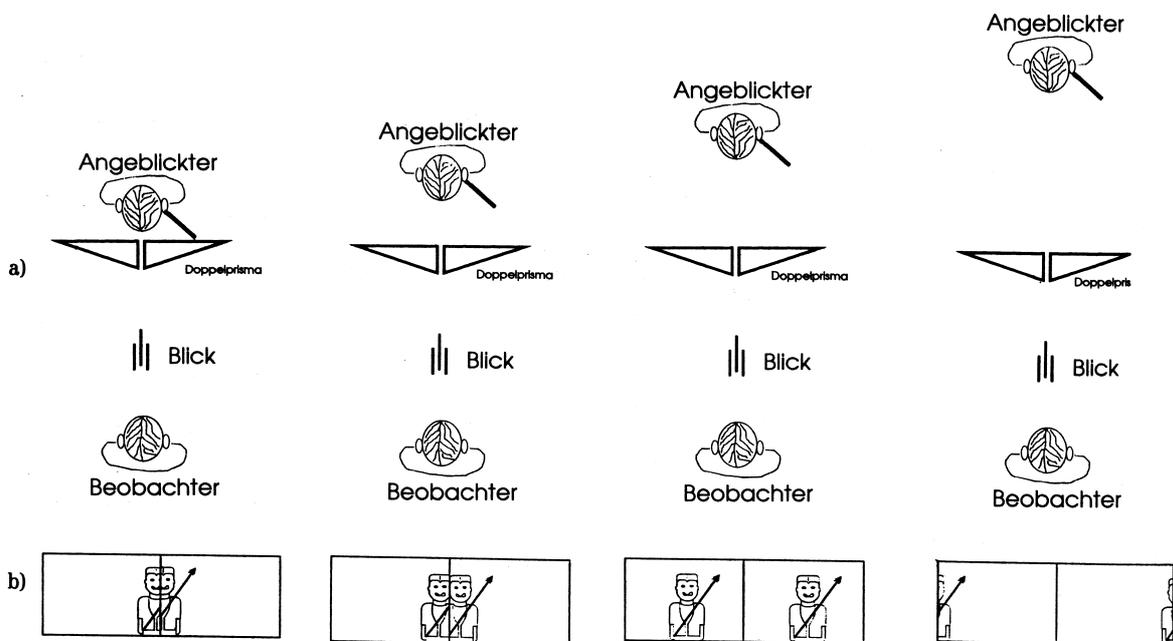


Abb. 4:

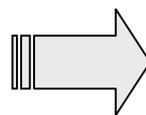
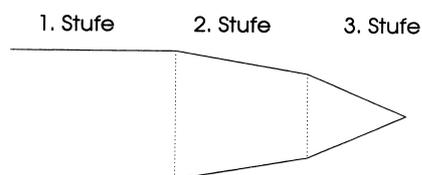
Ansichten beim Durchblick durch ein Doppelprisma nach MACKENSEN. a) Draufsicht, b) Ansichten.

fe) und die Dinge hinter dem Endstück – bei e - aufgrund des größeren Prismenwinkels weiter verschoben sein (3. Stufe). Würde man diese Abstufung immer feiner vornehmen, so ergäbe sich einerseits eine immer feinstufigere Verschiebung der erblickten Dinge und andererseits würde sich die Konfiguration immer mehr dem Schnitt längs des Durchmessers einer Konvexlinse annähern. Damit wird aber die Vergrößerung der Ansichten von Gegenständen in nicht zu großem Abstand hinter der Linse unmittelbar verständlich: man muss sich die Tangentialflächen an die Linse als beliebig feinen Übergang unendlich vieler Prismensegmente denken, die so angeordnet sind, dass aufgrund des zunehmenden Prismenwinkels Dinge, die weiter vom Mittelpunkt der Linse entfernt sind, weiter verschoben werden als Dinge, die dem Mittelpunkt näher liegen. Es kommt zu einer zentrischen Streckung der Ansicht.

Die schon am Prisma erarbeitete Tatsache, dass die Verschiebung der Ansichten zunimmt, umso weiter die Gegenstände hinter dem Prisma liegen, erweist sich nun, allerdings in einer neuen Konfiguration, als ein wesentliches Element im Verständnis der Linsenabbildung. Dazu muss man sich klar machen, dass die in *Abbildung 4* beobachtende Person mit zunehmendem Abstand vom Doppelprisma immer weniger ihren Kopf wenden muss, um rechts oder links im Prisma etwas zu sehen. Ihre Blickrichtung liegt dem Lot auf die Prismenfläche näher, der gesehene Ansichtsinhalt geht daher auf Teile der Gegenstände hinter den Prismen zurück, die weiter entfernt von den entsprechenden ziehenden Kanten liegen.

Verfolgt man eine helle, markant leuchtende Gegenstandskonfiguration (z. B. aus verschiedenen Lampen), während man durch die Konvexlinse blickt, so sieht man in analoger Weise mit zunehmendem Abstand von der Linse die Konfiguration vergrößert – bis schließlich, bei ei-

Grundriss des Prismas:



Verschiebung der Ansichten:

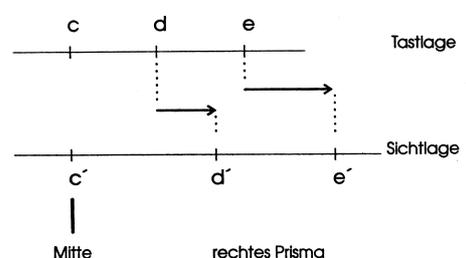


Abb. 5:

Verschiebung der Ansichten bei einem Prisma, das aus Teilprismen unterschiedlicher Prismenwinkel aufgebaut ist.

nem bestimmten Abstand, die Linse ganz mit einer Farbe erfüllt ist, die nur noch einem Fleck der angeblickten Konfiguration entspricht. Nur leichte Bewegungen des Kopfes lassen einen dabei sofort bemerken, wie mit feinen Positionswechseln sofort die Linse ganz mit der Farbe eines daneben liegenden Fleckes der Konfiguration erfüllt wird. Der entsprechende Fleck, auf den die farbliche Füllung der ganzen Linse zurückgeht, liegt dabei mit der Linsenmitte und dem Auge in einer Flucht. Gleichzeitig kann eine von außen den Versuch verfolgende Person auf der Stirn der Beobachterin oder des Beobachters ein umgekehrtes Bild der entsprechenden Konfiguration sehen. Ein Schirm zeigt an dieser Stelle ein umgekehrtes Bild der entsprechenden Konfiguration.

Da jeder Ort auf dem Schirm genauso hell ist, wie man von ihm aus Helles in seiner Kuppel sieht (Kapitel 3.1.1) und die Linse mit ihrer einheitlichen Farbigkeit ein wesentlicher Bestandteil dieser Kuppel ist, kann man rein aus dem Sehen heraus sich auch hier klar machen, warum genau an der Stelle ein Bild erscheint, wo für eine Beobachterin oder einen Beobachter eine Ansicht verschwimmt, d.h. so vergrößert wird, dass ein Fleck mit seiner Farbigkeit die ganze Linse erfüllt. Die Linsenabbildung wird aus den Ansichten von den verschiedenen Orten in der Bildebene punktweise erklärt.

MACKENSEN ordnet noch mit Hilfe von Blickwegen das hier Ausgeführte (MACKENSEN 1998, S. 47). Diese Ordnung wird in einem späteren Kapitel (Kapitel 4.3.2) unter einem formal etwas modifizierten Gesichtspunkt, nämlich im Konzept optischer Wege, aufgegriffen und soll hier nicht referiert werden.

3.1.4 Zur Beugung

In der curricularen Arbeit der Freien Waldorfschulen gibt es zur Beugung verschiedene Ansätze, die aber noch nicht in ein geschlossenes Unterrichtskonzept eingeflossen sind. MACKENSEN und OHLENDORF haben die FRESNEL-Beugung untersucht und in Unterrichtsvorschläge eingearbeitet (MACKENSEN 1998), während MAIER sich mit einem weniger didaktischen und eher grundsätzlichen phänomenologischen Interesse der FRAUNHOFER-Beugung widmete (MAIER 1981, MAIER 1984, MAIER 1990, MAIER 1993). Dessen ungeachtet stellen aber die Arbeiten MAIERS einen reichen Schatz an Experimenten und Gesichtspunkten dar, die den Unterricht bereichern und erweitern können und wesentlich die hier entwickelten Ansätze

zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege geprägt haben. Von daher soll auf seine Arbeiten ausführlich Bezug genommen werden.

MAIER geht in seiner ersten Arbeit zur Beugung von eingebundenen Versuchen aus. Damit steht die beobachtende Persönlichkeit selbst in dem Bedingungsgefüge drinnen, unter dem Beugungsbilder erscheinen. Die sich so ergebenden und in Versuchsreihen abwechselnden Sichtbeziehungen werden von ihm phänomenologisch untersucht. Die für gewöhnlich dem Wellenmodell des Lichtes zugeordneten Größen, wie die Amplitude, fasst er als reine Gedankenformen auf, die im Kontext des Experimentes bemerkt werden können.

Zunächst schildert MAIER eine Beobachtungssituation, wo eine experimentierende Persönlichkeit im Gegenlicht steht und mit dem Daumen, einer Münze und schließlich einer scharf umrandeten Rasierklinge die Sonne verdeckt. Beugungserscheinungen treten am Rand der verdeckenden Gegenstände auf, Helles wird dort gesehen, wo man Schatten erwartet. Außerdem ist in Richtung der Sonne der Himmel besonders trüb bzw. milchig zu sehen, vielleicht treten sogar gewisse Höfe auf. Ein weißlich-grauer Glanz liegt über vielen Dingen, die sich als dunkle Silhouette im Gegenlicht zeigen. Nicht zuletzt werden raue Gegenstände bei streifenförmigem Anblick von einem weißlichen Glanz überzogen. Die Beugung tritt im Kontext umfassender Helligkeitsverhältnisse auf, die den scharfen Kontrast des Gegenlichtes mildern. Die Trübe als ein inhomogenes optisches Mittel in Durchsicht und die granularen oder rauen Oberflächen scheinen dafür bedingende Faktoren zu sein und in enger Verbindung zu den Beugungserscheinungen zu stehen. Allgemeiner gesprochen wird von Anfang an darauf hingewiesen, dass zwischen regelmäßigen Beugungsbildern und Höfen oder Strahlenkränzen im Zusammenhang granularer Strukturen ein enger Zusammenhang besteht.

In einem nächsten Schritt untersucht MAIER Ansichten, die sich beim Blick durch ein sehr kleines Loch von weniger als einem Millimeter Durchmesser ergeben – er gibt also durch den Versuch künstlich die „Pupillengröße“ vor. Dort werden die Beobachterin und der Beobachter sofort von der ungemeinen Tiefenschärfe der Ansicht und der völlig entspannten Akkommodation des Auges beeindruckt sein. Gleichzeitig kommt aber ein grauer Schleier hinzu, der über allem liegt, bis dahin, dass feine Strukturen nicht mehr gesehen werden können, die Sicht also an Deutlichkeit verliert. - Indem man nun vom Durchblick durch ein Loch zum Durchblick durch einen engen Spalt übergeht, wird die Pupille nur noch in einer Richtung künstlich eingeengt. Es erscheinen nun Lampen mit einem hellen Muster senkrecht zu den Spaltkanten

umgeben, das sich nach beiden Seiten mit äquidistanten hellen Flecken entfaltet, wobei diese Flecken vom Spalt weg gelb-rote Ränder haben, zum Spalt hin blau-violette.

Durch ein Gedankenexperiment, bei dem man das kleine Loch aus der Überlagerung vieler Spalte in unterschiedlicher Richtung hervorgehen lässt, wird klar, dass auch hier die Kontraste der Dinge beim Durchblick vervielfacht werden und zwar in alle Richtungen. Dadurch ergibt sich insgesamt ein einheitliches Grau. Eine gut zu beobachtende Zwischenstufe dieser schrittweisen Verwandlungsabfolge hat man, wenn man durch einen Spalt auf zu den Spaltkanten parallele Kanten der Gegenstände blickt. Diese sind dann unscharf, während dazu senkrechte Kanten noch klar und deutlich bleiben.

Durch eine künstliche Verengung der Pupille im Experiment werden die Bedingungen für eine deutliche Sicht nicht mehr erfüllt und dahingehend verändert, dass der deutliche Kontrast parallel zur Richtung der Verengung sich auflöst und kleine, scharf kontrastierte helle Flecken innerhalb der Ansicht sich in regelmäßiger Vervielfachung als Elemente eines Musters senkrecht zu den Spaltkanten zeigen. Sind diese hellen Flecken Lampen einer bestimmten Form, so zeigen sich vervielfachte Lampenansichten derselben Form. Je geringer die Spaltbreite wird, umso weiter liegen die Abstände der hellen Flecken in diesem Muster auseinander. Geht man von Einzelspalten zu Gittern und schließlich zu Geweben über, so werden die Muster komplexer. Die Orthogonalität zur Richtung der Spalte oder Fäden innerhalb der durchblickten Strukturen bleibt aber bei allen gesehenen Mustern erhalten, wie auch ein kleinerer Abstand innerhalb der durchblickten Strukturen stets weitere Abstände bei den gesehenen Mustern bedingt. Solche gesehenen Muster werden Beugungsbilder genannt. Kleine, regelmäßige Strukturen im Durchblick bedingen wohlgeordnete Beugungsbilder.

Der diffuse helle Schein beim Durchblick oder spiegelnden Anblick granularer Strukturen wird so unmittelbar verständlich: Auch hier werden Strukturen mit kleinen Abständen zwischen den einzelnen Kontrasten durchblickt. Allerdings sind hier die verschieden geformten Öffnungen und Muster statistisch verteilt. Dadurch kommt es zu keiner regelmäßigen Anordnung heller Flecken mehr, sondern zur Ausbildung von Höfen oder Scheinen. Im Gegenlicht ist ein solcher Schein bzw. Strahlenkranz vor den dunklen Silhouetten der Gegenstände nicht zuletzt durch die Granulation im Auge selbst bedingt. Beugung und Höfe bzw. Strahlenkränze gehören demselben Erscheinungszusammenhang an.

Neben der Verbindung zu Scheinen, Höfen bzw. zur Granulation bezieht MAIER auch die Veränderungen des Beugungsbildes eines Spaltes bei Rotationen und Translationen mit ein. Insbesondere untersucht er das Beugungsbild, wenn man einen senkrechten Spalt so kippt, dass die Rotationsachse senkrecht zur Spaltkante steht, aber in der Spaltebene selbst liegt. Das Beugungsbild nimmt dann die Form eines Kegelschnittes an (siehe *Abbildung 23* in Kapitel 5.1.1). Hier sucht MAIER die geometrischen Gebilde auf, durch welche die Verformung und Gliederung des Beugungsbildes zu fassen ist. Er macht schon darauf aufmerksam, dass dieses wohl in einem „Reziprokkörper“ zu finden sein wird, dessen Schnitte mit einer Kugel die Gliederung des Beugungsbildes bestimmen. Mit anderen Worten: MAIER sucht die aus der Festkörperphysik und Röntgen- bzw. Neutronenstreuung bekannten Elemente des reziproken Gitters und der EWALD-Kugel im Versuch selbst auf (KITTEL 1989, KOPITZKI 1989)⁴. Er findet, dass die Gedankenformen dieser Elemente sich hier als tragfähig erweisen, und er zeigt exemplarisch, wie für einen Spalt, einen halbdurchlässigen Spiegel oder einen spiegelnden Zylinder durch FOURIERtransformation die reziproken Elemente gefunden werden können. Allerdings gibt er keinen geschlossenen Weg zur Ableitung dieser Gedankenformen aus den Experimenten an. Diese Lücke war wesentlicher Anlass dafür, im Rahmen der vorliegenden Arbeit einen geschlossenen didaktischen Weg hin zu diesen Elementen zu suchen und stufenweise die den Erscheinungen immanenten geometrischen Ordnungselemente einzuführen und ihre Tragfähigkeit zu analysieren. Da dies im Konzept optischer Wege in den folgenden Kapiteln ausführlich entfaltet wird (Kapitel 5.1 und 5.4), soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden, die Veränderungen des Beugungsbildes bei Translationen und Rotationen des Spaltes detailliert zu schildern.

Auf eine weitere Größe, die im Rahmen des Wellenmodells als Amplitude eingeführt wird, macht MAIER im Rahmen der Experimente wieder als reine Gedankenform aufmerksam: er setzt die Beugungsbilder komplementärer Muster, insbesondere die Beugungsbilder eines Spaltes mit dem eines dünnen Drahtes, in Beziehung. Außerhalb des Bereiches der geometrischen Abbildung (BERGMANN 1993) haben diese das gleiche Beugungsbild (BABINETSCHEES Prinzip). Sofern die Observable proportional zum Amplitudenquadrat ist, für die Ergänzung komplementärer Muster aber eine Amplitudenaddition zu denken ist, ergibt sich eine sinn-

⁴ Bei der Röntgenstreuung am Kristall muss zwischen dem Wellenzahlvektor \mathbf{k}_0 des einfallenden Photons und dem Wellenzahlvektor \mathbf{k} des elastisch gestreuten Photons die Beziehung $\mathbf{k} - \mathbf{k}_0 = \mathbf{G}$ gelten, wobei \mathbf{G} ein Vektor des reziproken Gitters ist. Diese Beziehung lässt sich graphisch mit Hilfe der EWALD-Kugel lösen.

volle Beziehung zu den Beugungserscheinungen. – Im Rahmen dieser Arbeit wird aber, ausgehend von der Intensitätsverteilung des Beugungsbildes am Doppelspalt, auf rotierende Zeiger als Ordnungselement zurückgegriffen und damit der von MAIER beschrittene Weg nicht weiter verfolgt.

Lässt man die Behandlung der Beugungsbilder komplementärer Muster und die Verwandlungen des Beugungsbildes bei Rotationen des durchblickten Musters unberücksichtigt und geht vielmehr nur von dem wohl am häufigsten durchgeführten Experiment aus, bei dem das Muster senkrecht durchblickt wird, so gilt es als zentrales Element der Erscheinungen die regelmäßige Vervielfachung der Ansichten festzuhalten. Je regelmäßiger das durchblickte Muster geordnet ist, umso deutlicher werden die vervielfachten Ansichten.

Verwendet man an Stelle eines kommerziellen Spaltes mit scharfen Kanten ein entsprechendes Dia mit einem nicht so hohen Kantenkontrast, so bemerkt man, wie die Ausdehnung des Beugungsbildes zunehmend geringer wird. Die Schärfe des Kontrastes spielt also eine wichtige Rolle beim Zustandekommen des Beugungsbildes. Dabei kann diese Beobachtung bei monochromatischer Beleuchtung besser durchgeführt werden, weil so die farbliche Entfaltung des Beugungsbildes unterbleibt.

MAIER fasst schließlich diese Erscheinungsreihe dahingehend zusammen, dass er formuliert:

- *Das Prinzip regelmäßiger Vervielfältigung ist die Transformation von scharfem Kontrast – und umgekehrt.*

Mit der Erweiterung „und umgekehrt“ meint er, dass die Transformation von regelmäßiger Vervielfältigung die Ausbildung von scharfem Kontrast ist. Dieser Satz kommt in zweifacher Weise zum Tragen: Zum einen werden mit dem Übergang vom Spalt zum Doppelspalt und schließlich zum Gitter die Kontraste zwischen den vervielfachten Lampenansichten oder hellen Flecken immer deutlicher. Außerdem ergibt sich noch beim Übergang vom Einzelspalt zum Doppelspalt ein qualitativ etwas modifizierter Aufbau des Beugungsbildes hin zu völlig äquidistanten Lampenansichten, der dann beim Gitter erhalten bleibt und nur noch an Schärfe gewinnt (bei nicht zu großen Winkeln). Zum anderen kann aber eine scharfe Ansicht von Dingen sich nur dann ergeben, wenn nicht durch Blenden oder durch die Pupille verschiedene Beugungsordnungen ausgeblendet werden. Dieser Übergang wird erst deutlich, wenn man sowohl den Durchblick durch als auch den Anblick auf eine Struktur untersucht. Detailliert

wird dieser Zusammenhang für den schulischen Kontext im Rahmen dieser Arbeit in einem späteren Kapitel (Kapitel 4.4.1 und 4.4.2) entwickelt werden. Er geht aber auf die Untersuchungen MAIERS zum Wechsel von Durch- und Anblick im Rahmen von Freihandexperimenten zurück. Diese sollen hier zum Abschluss referiert werden.

Blickt man durch einen engen Spalt auf eine Lampe mit einer hellen, kleinen Glühwendel vor dunklem Hintergrund, so wird man das entsprechende Beugungsbild mit seinen vervielfachten Lampenansichten gut erkennen können. Entfernt man nun den Spalt schrittweise vom Auge und schaut dabei weiterhin die Lampe an, blickt also weiterhin durch den Spalt hindurch, so bleibt das Beugungsbild erhalten. Gleichzeitig wird die perspektivische Größe des Spaltes im Gesichtsfeld kleiner, so dass seine geringe Breite bedingt, dass nur Teile des Beugungsbildes zu sehen sind. Schiebt man allerdings den Spalt nach rechts oder links, so kann man sich davon überzeugen, dass weiterhin dann die entsprechenden Elemente des Beugungsbildes erscheinen und das Beugungsbild seine Größe nicht verändert. Um die zuletzt genannte Beobachtung sauber aufzufassen, darf man sich nicht durch die kleinere perspektivische Größe des Spaltes im Gesichtsfeld irritieren lassen, sondern man muss als Referenz bewusst eine Größenabschätzung über das eigene Leibesgefühl heranziehen.

Hat der Spalt einen Abstand von ca. 20 cm zum Auge erreicht, kann man vom Durchblick durch den Spalt zum Anblick des Spaltes übergehen, indem man bewusst seine Akkommodation entsprechend führt. Wie *Abbildung 6* zeigt, zieht sich dann das Beugungsbild zusammen, die Spaltkanten treten scharf hervor und im Zwischenraum des Spaltes sieht man eine ausge dehnte Helligkeit. Das Erlebnis, dass wir mittels unserer Akkommodation entscheiden können,

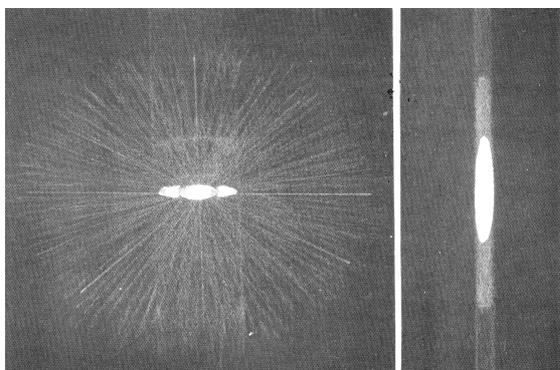


Abb. 6:

Der Übergang vom Durchblick zum Anblick nach MAIER.

was innerhalb des Versuchsaufbaus wir in welcher Ansicht sehen wollen, kann immer wieder ein tief beeindruckendes Erlebnis sein. Entweder sieht man in dem geschilderten Versuch das Beugungsbild der Lampe, während der Spalt nicht deutlich gesehen wird, oder man sieht eine Ansicht des Spaltes, während die Lampe undeutlich bleibt. Durch Akkommodation wählt man komplementäre Ansichten im Ensemble des Versuchsaufbaus aus. Die Deut-

lichkeit *einer* Ansicht geht mit dem Verschwinden *einer anderen* Ansicht einher. Die beobachtende Persönlichkeit ist in komplementärer Weise – je nach Akkommodation – in den Versuch eingebunden.

Diese Entdeckung und insbesondere sprachliche Fassung MAIERS stellt im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein wichtiges Motivationselement dar, den Durchblick und Anblick von Strukturen in einem Versuch zusammenzufassen und dort die Verbindung zur Quantentheorie weiter aufzusuchen.

3.2 Das Lichtwegkonzept nach ERB und SCHÖN

Parallel zu den Arbeiten von MACKENSEN, MAIER und OHLENDORF haben ERB und SCHÖN das Lichtwegkonzept entwickelt, das dann u.a. von WEBER und WERNER weiter ausgearbeitet bzw. untersucht wurde (ERB 1994, SCHÖN 1992, 1994, 1997, WEBER 2003, WERNER 2000). Es greift u. a. Arbeiten von DRUXES und RHÖNECK auf (DRUXES 1973, RHÖNECK 1976).

Das Lichtwegkonzept setzt in der 9. bzw. 10. Klasse an und baut auf dem Hintergrund des FERMAT-Prinzipes die Optik mit Lichtwegen aus, bis in der Oberstufe abstrakte Konzepte beispielsweise im Rahmen der Zeigeroptik vermittelt werden. Als unterrichtliche Voraussetzung mag es das von SCHÖN entwickelte Curriculum „Vom Sehen zur Optik“ haben (SCHÖN 1992), welches am Anfang des Physikunterrichtes von einer phänomenologischen Vorgehensweise ausgeht (6./7. Klasse).

Die in dieser Arbeit vorgestellte phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege geht auf das FERMAT-Prinzip zurück. Sie greift damit Unterrichtsvorschläge im Rahmen des Lichtwegkonzeptes auf und setzt diese fort. Einige Elemente dieser Unterrichtsvorschläge sollen hier zunächst dargestellt werden.

3.2.1 Leitziele und kumulatives Lernen

Dem Lichtwegkonzept werden von ERB drei Leitziele übergeordnet: die Bedeutung des Verstehens, die Beobachtung als Ausgangspunkt und die Tragfähigkeit der Inhalte (ERB 1994).

Können die Lernenden zunehmend Gegenstände in Zusammenhänge einordnen und wird ihnen gleichzeitig der Weg zu diesen Zusammenhängen deutlich, so erweitern sie nicht nur ihr Verständnis, sondern sie erleben gleichzeitig auch, welche generelle Bedeutung dem Verstehen in der Auseinandersetzung mit der Lebenswelt zukommt. Dabei mag die Einordnung in Zusammenhänge deskriptiv, transduktiv oder auch deduktiv sein, was ERB im Einzelnen untersucht. Solche Untersuchungen fasst er schließlich zum Leitziel „Bedeutung des Verstehens“ wie folgt zusammen: *„Dem Verstehen physikalischer Zusammenhänge soll ein höherer Stellenwert als dem Wissen von Fakten eingeräumt werden. Dies wird erreicht durch Erarbeiten von Beschreibungen auf einer übergeordneten Ebene.“*

Bei seinem zweiten Leitziel „Beobachtung als Ausgangspunkt“ recurriert ERB insbesondere auf WAGENSCHEN. Im Kapitel zum Rahmen der Beobachtung (Kapitel 2.2) wurde in dieser Arbeit schon ausführlich auf BLEICHROTH, SCHÖN und WAGENSCHEN Bezug genommen. Auf diese Autoren beruft sich ERB ebenfalls. Deshalb soll das dort Ausgeführte hier nicht wiederholt, sondern lediglich das Ergebnis der ERBSCHEN Untersuchungen referiert werden: *„Die Beobachtung stellt die Brücke zwischen der möglichst unvoreingenommenen Wahrnehmung und der physikalischen Beschreibung dar. Ihr kommt deshalb besondere Bedeutung für die physikalische Erkenntnisbildung zu“.*

Wenn Erscheinungen zunächst beobachtet und im Gang des Unterrichtes dahingehend verstanden werden, dass eine Beschreibung auf einer höheren Ebene gelingt, so kann diese höhere Ebene zwar an Anschaulichkeit verlieren, dadurch aber eine Fülle von Erscheinungen zusammenfassen. Erreicht man dabei, dass die Schülerinnen und Schüler immer wieder Bezüge auf zuvor Gelerntes herstellen, so wird die Wissensbasis auf dem Hintergrund des zuvor Gelernten erneut, aber vertieft strukturiert oder reorganisiert. Die gelernten Inhalte erweisen sich als tragfähig. Im Rahmen einer vertikalen Vernetzung der Unterrichtsinhalte in der dargestellten Art ist diese Tragfähigkeit der Inhalte besonders gegeben. - ERB selbst fasst sein drittes Leitziel wie folgt zusammen: *„Die wesentlichen Unterrichtsinhalte müssen über einen weiten Bereich tragfähig sein. Die Verbindungen zu anderen Unterrichtsinhalten müssen deutlich werden“.*

WEBER konnte in einer vergleichenden Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik zeigen (WEBER 2003), dass der Unterricht nach dem Lichtwegkonzept bei den Schülerinnen und Schülern die Wahrnehmung der Physik als zusammenhängendes Gedankengebäu-

de wie auch die Kumulativität des Unterrichtes fördert. Dabei wurde die Kumulativität des Unterrichtes am Aufbau einer gut organisierten Wissensbasis, an der Anschlussfähigkeit des erworbenen Wissens und dem Erleben von Kompetenzzuwachs gemessen.

3.2.2 Vom Sehen zur Optik - 6. und 7. Klasse

SCHÖN und ERB konstatieren am Beginn ihrer Darstellungen (ERB 1996), dass die Optik, so wie sie in der Schule gelehrt werde, das Sehen verlernt habe. - Das Curriculum „Vom Sehen zur Optik“ greift den phänomenologischen Ansatz MACKENSENS auf. Damit entsprechen sich viele Versuche innerhalb der von SCHÖN und MACKENSEN entwickelten Curricula. Insbesondere übernimmt SCHÖN die schon bei BERKLEY propagierte Unterscheidung von Seh- und Tastraum (BERKLEY 1912). Auch ihm gelingt es, die Komplexität der Phänomene nicht durch abstrakte Vereinfachungen zu ersetzen und trotzdem ein Verständnis der Erscheinungen zu erreichen. Da die einzelnen Inhalte, insbesondere beim Spiegel, in einem vergleichbaren Rahmen zu den Arbeiten MACKENSENS entwickelt werden, MACKENSENS Arbeiten aber schon ausführlich referiert wurden, soll an dieser Stelle auf das Curriculum „Vom Sehen zur Optik“ nicht weiter Bezug genommen werden.

3.2.3 Geometrische Optik und das FERMAT-Prinzip - 9. und 10. Klasse

Die Erscheinungen, welche die Schülerinnen und Schüler phänomenologisch nach dem Curriculum „Vom Sehen zur Optik“ bereits kennengelernt haben, greift das Lichtwegkonzept auf und behandelt sie im Rahmen einer geometrischen Optik. Am Anfang dieser Optik steht die geradlinige Ausbreitung des Lichtes, welche durch Schattenversuche erarbeitet wird.

Den Begriff der Geradlinigkeit kann man, will man auf die geradlinige Ausbreitung des Lichtes hinaus, nicht dem Sehen oder Leuchten selbst entnehmen. Vielmehr benötigt man eine davon unabhängige Definition. Diese formulieren ERB und SCHÖN, wie allgemein üblich, im Rekurs auf einen gespannten Faden, der die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten darstelle. Sie nehmen also auf geometrische Vorstellungen bzw. Präkonzepte Bezug.

Findet man im Versuch, dass Schattengrenzen mit entsprechend gespannten Fäden zusammenfallen und geht man von einem sich geradlinig ausbreitenden Lichtstrom aus, so sind die-

se Schattengrenzen die Projektionen aller Lichtwege, welche direkt an der Begrenzung des Schatten werfenden Gegenstandes entlanglaufen. Man kann dann schließen: *„Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten einen geraden Weg“*.

Im Übergang zu entsprechenden Schattenversuchen am ebenen Spiegel zeigt sich, dass dort Fäden, die mit Schattengrenzen zusammenfallen sollen, so gespannt werden müssen, dass sie an der Spiegeloberfläche abknicken, wobei die Winkelhalbierende des Knickwinkels senkrecht auf der Spiegelfläche steht. Im Rückschluss auf ein sich ausbreitendes Licht diesseits der Spiegeloberfläche ergibt sich das bekannte Spiegelgesetz: für die Lichtwege gilt *„Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“*.

Indem ein mit einer Schattengrenze zusammenfallender gespannter Faden so verändert wird, dass man ihn am Ort der Lampe und nach seinem Knick an der Spiegelfläche an einem weiteren Punkt fixiert, man aber gleichzeitig Bewegungen an der Spiegelfläche zulässt, bemerkt man, dass die Knickstelle sich dann bei sämtlichen Bewegungen von der Spiegelfläche entfernt. Andere, zum vorgefundenen Lichtweg mögliche Nachbarwege, sind also länger. Am Spiegel gilt: *„Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den kürzesten Weg (im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen)“*. Dieses Prinzip kürzester Lichtwege schließt die geradlinige Ausbreitung mit ein und erweist sich so auch für die einfachen Schattenversuche als tragfähig.

Erweitert man die Spiegelversuche und untersucht konvex und konkav gebogene Spiegel, so bemerkt man insbesondere am konkav gebogenen Spiegel, dass ab einem gewissen Grad der Biegung zunächst im Raum vor der entsprechenden Lampe oder Kerze auf einem Schirm ein umgekehrtes Kerzenbild erscheint, bei Voraussetzung eines sich ausbreitenden Lichtstromes dort also Licht gesammelt wird. Eine Beobachterin oder ein Beobachter bemerken, wenn sie mit ihrem Auge an diese Stelle gehen, dass sie die ganze Spiegelfläche erhellt sehen. Entsprechend zwischen Lampe und Spiegel eingefügte undurchsichtige Körper bedingen Schattengrenzen, welche bei jeder Stellung durch das entsprechende umgekehrte Bild der Lampe auf dem Schirm laufen.

Geht man schließlich zur Ausmessung dieser Schattengrenzen bzw. Lichtwege mit einer entsprechend der obigen Schilderung aufgebauten Fadenkonstruktion über, so bemerkt man, dass alle Lichtwege gleich lang sind. Das Prinzip des kürzesten Lichtweges erhält folgende Erweiterung: *„Am gebogenen Spiegel gibt es zwei Punkte, zwischen denen es unendlich viele Licht-*

wege gibt. Stehen dem Licht mehrere gleichlange (benachbarte) Lichtwege zur Verfügung, so nimmt es all diese“⁵. Mit dieser Feststellung wird ein Zusammenhang gefunden und formuliert, den die Schülerinnen und Schüler wieder finden, wenn sie die Linse bzw. die optische Abbildung mittels Linsen kennen lernen.

Auch die Brechung bzw. Hebung untersuchen ERB und SCHÖN anhand des Verlaufes einer Schattengrenze. Diese knickt am Übergang von Luft zu Wasser ab, wie bei einer entsprechenden Stellung von Lampe und verdecktem Gegenstand der seitliche Blick auf ein mit Wasser gefülltes Aquarium zeigt. Auf dem Hintergrund der am Spiegel untersuchten Erscheinungen kann das dort formulierte Prinzip kürzester Lichtwege in der bis dahin gebräuchlichen Form nicht aufrecht erhalten werden.

An dieser Stelle schlägt ERB vor, mittels eines Analogieschlusses vom Prinzip kürzester Wege zum „Prinzip des schnellsten Weges“ überzugehen: Ein Schwimmer, der in möglichst kurzer Zeit ein Ziel im Wasser erreichen soll, der sich aber an Land schneller fortbewegen kann als im Wasser, wird seinen Weg immer so einrichten, dass er möglichst große Strecken zunächst auf dem Land überwindet und nur kurze Strecken schwimmen muss. Da die Schattengrenze so verläuft, dass, gegenüber einem geradlinigen Verlauf, im Wasser die entsprechende Teilstrecke kürzer wird, kann man vermuten, dort bewege sich das Licht langsamer. Dann würde ggf. das Licht beim Übergang von Luft zu Wasser einen Weg nehmen, den es gegenüber möglichen Nachbarwegen in kürzerer Zeit zurücklege. Dieses „Prinzip der schnellsten Lichtwege“ schliesse das Prinzip kürzester Lichtwege für die bisher besprochenen Erscheinungen mit ein.

An dieser Stelle des Lichtwegkonzeptes muss man, will man dem Weg ERBS folgen, die Lichtgeschwindigkeit behandeln, um das Curriculum in einen geschlossenen Rahmen zu stellen. Dies bedeutet entweder einen großen experimentellen Aufwand oder eine mehr qualitative Diskussion anhand eines Experimentes, bei dem in den Strahlengang eines MICHELSON-Interferometers eine Glasplatte gestellt wird. Da der Begriff der Interferenz zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingeführt ist, durch die Glasplatte sich aber gerade das Interferenzmuster ändert, kann man nur die erwähnte qualitative Diskussion führen (ERB 1994, S. 64 ff). Als Alternative bieten sich historische Exkurse zur Lichtgeschwindigkeit an. - Auf jede Fall setzt

⁵ Durch diese Formulierung und den dargestellten didaktischen Weg muss man nicht thematisieren, inwiefern die Lichtwege am Wölbspiegel gegenüber denkbaren benachbarten Wegen maximale Länge haben.

der weitere Gang des Curriculums voraus, dass die Schülerinnen und Schüler folgendes Ergebnis zur Verfügung haben: „Licht bewegt sich in unterschiedlichen Medien mit unterschiedlicher Geschwindigkeit“, und insbesondere: „Die Lichtgeschwindigkeit ist in Glas etwa $\frac{2}{3}$ mal der in Luft und in Wasser etwa $\frac{3}{4}$ mal der in Luft“.

Steht das Ergebnis unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten für Licht in Luft und in Wasser zur Verfügung, können die Schülerinnen und Schüler die Vermutung, Licht breite sich nach dem Prinzip schnellster Lichtwege aus, überprüfen. Dazu erstellen sie gemäß *Abbildung 7* „Zeitlineale“, welche durch ihren Maßstab die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten berücksichtigen. Mit den entsprechenden Linealen messen sie die Teilstrecken möglicher Lichtwege außerhalb und innerhalb des Wassers aus und berechnen die Gesamtzeit. Dabei werden der Anfangs- und Endpunkt der Lichtwege vorgegeben, auf der Wasseroberfläche aber die Abknickstellen variiert und mittels einer Koordinate bezeichnet. Ein Vergleich mit dem Experiment bestätigt die Vermutung, dass der mittels einer Schattengrenze untersuchte Lichtweg im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen der Weg ist, welcher in der kürzesten

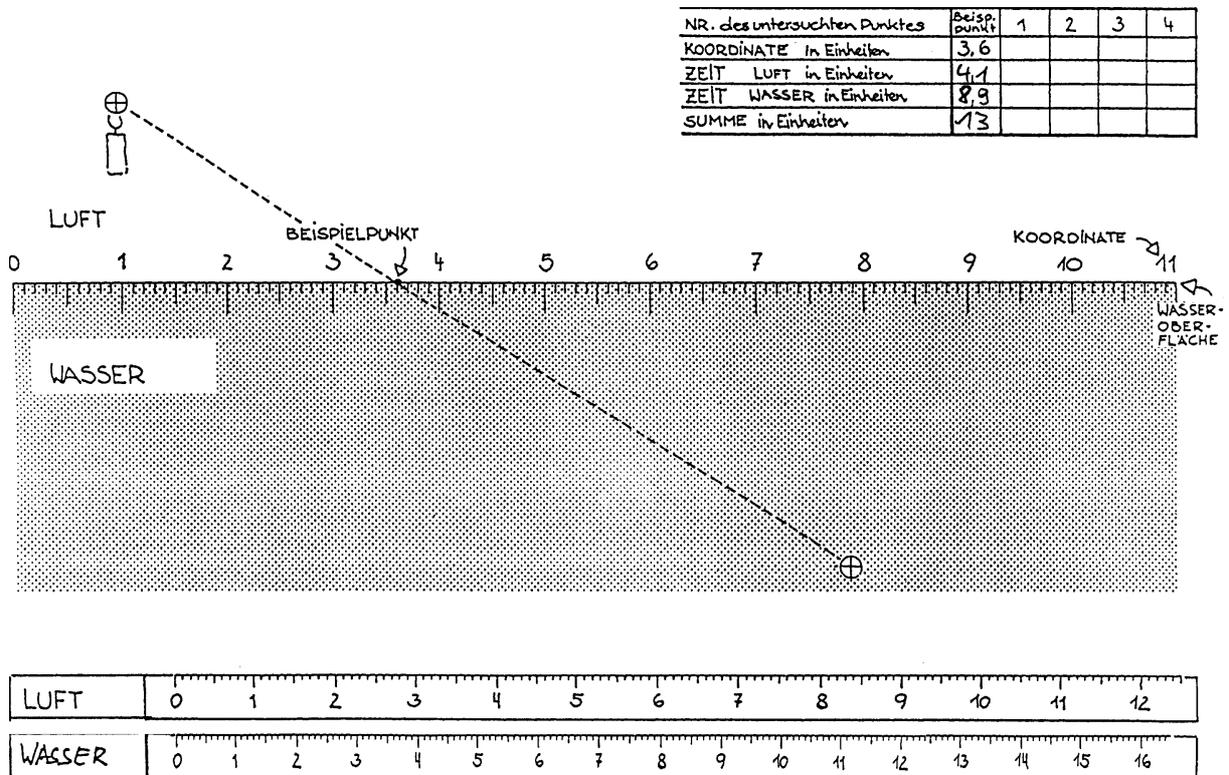


Abb. 7:

Zur Behandlung der Brechung nach ERB. Die Lichtwege werden mittels Zeitlinealen ausgemessen.

Zeit zurückgelegt wird. ERB formuliert das Ergebnis wie folgt: *„Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es, im Vergleich zu denkbaren Nachbarwegen, die kürzeste Zeit benötigt. Diese Formulierung bekommt den Namen ‚FERMAT-Prinzip‘“*. Wie bereits oben erwähnt, beinhaltet diese Formulierung auch die zuvor gefundenen Zusammenhänge.

Von der Brechung bzw. Hebung ausgehend sieht das Lichtwegkonzept die Behandlung der optischen Abbildung mittels Linsen vor. Dabei kann, wie oben erläutert, bereits die Besprechung des Hohlspiegels dieses Thema anlegen.

Bereits bei einfachen Abbildungen mittels einer Lochkamera ist einerseits wesentlich, dass alle Lichtwege, die man beispielsweise der hellen Flamme einer Kerze zuordnet, durch das Loch der Kamera gehen müssen, wenn sie das Abbild hervorrufen sollen. Ist das Loch ausreichend klein, liegen alle in Frage kommenden Lichtwege eines Punktes der Kerzenflamme innerhalb eines Kegels, dessen Mantelfläche von dem Punkt und der Begrenzung der Öffnung der Lochkamera festgelegt werden. So ist jedem Punkt der Kerzenflamme ein heller Fleck auf dem entsprechenden Schirm der Lochkamera zuzuordnen. Bei hinreichend kleiner Öffnung wird aus dieser „Punkt-zu-Fleck-Zuordnung“ annähernd eine „Punkt-zu-Punkt-Abbildung“, die umso schärfer ist, je lichtschwächer das Abbild wird.

Andererseits kann dieses Abbild überhaupt nur dadurch gesehen werden, dass das Gehäuse der Lochkamera alle anderen Lichtwege, welche ebenfalls zu dem entsprechenden Punkt der Kerzenflamme gehören, ausblendet. - Einerseits wird eine eindeutige Zuordnung durch entsprechende Bedingungen ermöglicht, andererseits bedeutet das gleichzeitig die Wegnahme von Lichtwegen.

Diesen Gesichtspunkt verfolgt ERB bei der Behandlung der Sammellinse weiter: Dort lenkt die Linse entsprechende Lichtwege beispielsweise eines Punktes der Kerzenflamme um. Dadurch werden diese aber nicht nur in einem Bildpunkt wieder fokussiert, sondern gleichzeitig wird die Umgebung dieses Bildpunktes auch nicht mehr durch entsprechend den Lichtwegen einfallendes Licht erhellt - in der Umgebung des Bildpunktes bedingt die Sammellinse einen Schatten. In diesem Sinne „blendet“ auch die Linse Lichtwege „aus“. In einem ersten Anlauf hält man also fest: *„Ein Bild ist die Stelle auf dem Schirm, an der mehr Licht von einem Gegenstand ankommt als auf dem restlichen Schirm“*.

Erste Überlegungen auf dem Hintergrund der obigen Formulierung des FERMAT-Prinzips in Verbindung mit der Form der Linse machen deutlich, wie längs der optischen Achse das Licht einen kürzeren Weg zurücklegen muss als über den Rand der Linse, dass dort aber eine größere Teilstrecke im Glas liegt, wo das Licht sich langsamer ausbreitet. Am Rand der Linse ist der Weg länger, dafür verläuft aber eine kürzere Teilstrecke im Glas. Insgesamt drängt sich die Vermutung auf, dass zwischen Gegenstands- und Bildpunkt alle Lichtwege in der gleichen Zeit durchlaufen werden - eine Vermutung, die besonders durch die Erfahrungen am Hohlspiegel untermauert wird.

ERB nimmt nun die Form der Linse in seinem Curriculum nicht einfach an, sondern er entwickelt ihre Form aus der Forderung, dass alle Lichtwege zwischen Gegenstands- und Bildpunkt in dergleichen Zeit durchlaufen werden. Dabei zeigt sich, dass bei gegebenem Gegenstands- und Bildpunkt die Linse die Form einer kartesischen Fläche haben muss. Solche Linsen bilden hervorragend ab, allerdings nur für die Gegenstands- bzw. Bildpunkte, für die sie ganz speziell konstruiert sind. Ausgedehnte Objekte bilden sphärische Linsen hingegen besser ab. Die genaue Analyse zeigt dann: bei sphärischen Linsen werden alle Lichtwege zwischen Gegenstands- und Bildpunkt in etwa der gleichen Zeit durchlaufen.

Als Zusatz zum FERMAT-Prinzip kann nun ERB formulieren: *„Stehen mehrere benachbarte Lichtwege zwischen einem Gegenstandspunkt und einem anderen Punkt zur Verfügung, die vom Licht in gleicher Zeit durchlaufen werden, so nimmt das Licht all diese. Die Lichtstärke in diesem Punkt ist dann größer als in der Umgebung. Er ist ein Bild des Lichtpunktes“*.

Die hier formulierte Erkenntnis ist nicht aus dem FERMAT-Prinzip selbst abzuleiten. Vielmehr wird sie unter Verwendung des Prinzips aus den Experimenten erschlossen.

3.2.4 Weiterführende Optik in der Oberstufe

In der Oberstufe geht das Lichtwegkonzept gleich von Erscheinungen aus, die aus dem Physikunterricht am Ende der Sekundarstufe I noch nicht bekannt sind. Im Einzelnen werden die partielle Reflexion, die quantenhafte Wechselwirkung von Licht und Materie und die Interferenz bzw. Beugung besprochen. Mit diesen Erscheinungen treten als neue formale Strukturen die Aufspaltung von Lichtwegen, die Wahrscheinlichkeitsinterpretation im Rahmen quantenhafter Wechselwirkungen und der Zeigerformalismus auf.

Durch den gegenseitigen Bezug von Ansichten beim Durchblick durch eine Glasscheibe einerseits und Spiegelansichten andererseits muss man für sich ausbreitendes Licht folgern, dass an der Glasscheibe die Lichtwege sowohl gemäß dem Spiegelgesetz als auch dem Brechungsgesetz abknicken⁶. Insbesondere kann man, wenn man Mehrfachreflexionen untersucht und die Polarisationserscheinungen unbeachtet lässt, ausschließen, dass die Glasplatte das Licht nach zwei Sorten von Licht aufspalte. Ein erstes Ergebnis lautet: *„Licht wird an einer Glasscheibe partiell reflektiert. Ein Lichtweg kann sich in zwei oder mehrere aufspalten“*.

In einem nächsten Schritt motiviert ERB die quantenhafte Wechselwirkung von Licht und Materie, indem die Schülerinnen und Schüler eine belichtete Fotoschicht unter dem Mikroskop betrachten sollen. Dort bemerken sie die entsprechende körnige Struktur, die durch das Nebeneinander von belichteten und unbelichteten Silberkörnchen besteht. Je länger die Fotoschicht belichtet wurde, umso mehr Silberkörner sind an den Stellen geschwärzt, welche dem Licht exponiert waren. Die Schülerinnen und Schüler lernen so schon den Gedanken kennen, dass der Zunahme der Lichtintensität die Zunahme bestimmter diskreter Ereignisse entsprechen mag. Bezogen auf den Prozess der Wechselwirkung entspricht der Schwärzung einzelner, räumlich begrenzter Silberkörnchen dann das zeitlich begrenzte, einzelne Wechselwirkungsereignis. Eine solche Wechselwirkung ist quantenhaft. Als Ergebnis lässt sich festhalten: *„Wird Licht am Ende eines Lichtwegs registriert, so geschieht dies immer portionsweise. Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ist quantenhaft“*.

Ist die quantenhafte Wechselwirkung von Licht und Materie formuliert, schließen sich weitere Besprechungspunkte an:

- Die Modellvorstellung eines Lichtteilchens: Einer quantenhaften Wechselwirkung von Licht und Materie kommt die Vorstellung eines eintreffenden Lichtteilchens sehr entgegen. Diese Modellvorstellung greift ERB auf. Da er dem Lichtteilchen nicht von vornherein klassische Attribute unterlegen will, führt er einen eigenen Namen für diese Teilchen ein und bezeichnet ein einzelnes Teilchen als Photon. Damit ist die Brücke zur Deutung des Photoeffekts durch EINSTEIN geschlagen.
- Eine quantitative Festlegung für die Photonen im Rahmen der Energiebilanz. Eine mögliche Realisierung findet sich im Rekurs auf ERB bei WERNER (2000, S. 152).

⁶ ERB greift hier eine Vereinfachung auf, die auch FEYNMAN in seinem Buch QED zunächst durchführt (FEYNMAN 2000, S. 27): Die Wechselwirkung von Licht mit den Glasatomen wird auf die Oberfläche begrenzt gedacht.

- Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation: Bringt man die partielle Reflexion mit der quantenhaften Wechselwirkung von Licht und Materie in Beziehung, so bedeutet ein Verhältnis von 4% reflektierter Intensität zu 96% an Intensität in Transmission, dass man dem einzelnen Photon nur noch eine Wahrscheinlichkeit zuordnen kann, mit der es an der Glasplatte reflektiert bzw. nicht reflektiert wird. Es gilt: *„Bei Experimenten, bei denen ein Lichtweg aufgeteilt wird, kann das Registrieren eines Photons nur in Form einer Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden“*.

Den Übergang zur Interferenz gelingt ERB im Anschluss an das hier Dargestellte über ein Experiment, bei dem beispielsweise eine dünne Seifenhaut mit einer monochromatischen Lichtquelle beleuchtet wird und man Hell-Dunkel-Streifen erblickt. Allgemeiner gesprochen zieht er Versuche heran, bei denen dem Licht zwischen Lichtquelle und einem Punkt des Schirmes zwei Lichtwege zur Verfügung stehen. Aus dem periodischen Muster auf der (keilförmigen) Seifenhaut oder auch auf dem Schirm hinter einem Interferometer muss man schließen, dass hier die Längendifferenz der Lichtwege die entscheidende Rolle spielt. Sie hängt mit einer Verstärkung und Auslöschung der Lichtintensitäten zusammen. Die Lichtintensitäten dürfen nicht einfach addiert werden. Erb formuliert: *„Kann das Licht auf zwei oder mehr Wegen von der Lichtquelle zu einem Punkt kommen, so dürfen nicht einfach die Intensitäten addiert werden. Es kommt zu dem Phänomen von Verstärkung und Auslöschung, welches Interferenz genannt wird“*.

Der Zusammenhang zwischen der beobachteten Interferenz und den Längen der Lichtwege kann der Zeigerformalismus herstellen. Dabei wird jedem Lichtweg ein Zeiger zugeordnet, der sich auf einer Basislänge λ um 360° bzw. 2π dreht. Dem Wechsel von Verstärkung und Auslöschung der Intensität entspricht bei zwei Lichtwegen, dass sich die beiden Lichtwege beim Übergang von einem Ort der Verstärkung zu dem Ort der benachbarten Verstärkung insgesamt um die Basislänge λ unterscheiden. Die Zeiger sind dann an den beiden Stellen mit Verstärkung parallel, ihre Vektoraddition liefert einen resultierenden Vektor mit der maximal möglichen Länge bzw. maximalen Betrages. An Stellen der Auslöschung stehen die Zeiger hingegen antiparallel, ihre Vektoraddition ergibt den Nullvektor. Im Übergang zwischen beiden Stationen nimmt der Betrag des resultierenden Vektors kontinuierlich ab; exakter: nimmt sein Betragsquadrat proportional zum Kosinusquadrat des halben Differenzwinkels ab.

ERB bemerkt (ERB 1994, S. 122), dass die Zusammenführung der beobachteten Interferenz mit der Länge der Lichtwege an dieser Stelle des Curriculums eine Setzung ist, die nicht weiter begründet werden kann. WERNER schlägt entsprechend als Unterrichtsmethode an dieser Stelle einen kurzen Lehrervortrag vor (WERNER 2000, S. 123).

Im Einzelnen ausformuliert ergibt sich, wenn man die Reflexion oder Absorption beiseite lässt und ungefähr gleiche Längen der Lichtwege voraussetzt:

- *„Bei mehreren Lichtwegen von einer Lichtquelle zum Empfänger müssen alle Wege berücksichtigt werden, um das richtige Ergebnis für die Intensität zu erhalten.*
- *Dabei trägt jeder Lichtweg vom Betrag gleich viel zum Ergebnis bei.*
- *Jedem Lichtweg wird ein Zeiger zugeordnet, der sich während der Lichtausbreitung dreht. Wenn der Zeiger eine vollständige Drehung gemacht hat, hat das Licht einen Weg zurückgelegt, der gleich seiner Basislänge λ ist.*
- *Die Länge des Zeigers wird so gewählt, dass das Quadrat die Wahrscheinlichkeit angibt, am Empfänger ein Photon zu registrieren.*
- *Um das Gesamtergebnis zu erhalten, müssen zunächst alle Zeiger wie Vektoren addiert werden. Anschließend wird die Resultierende quadriert“.*

Nachdem der Zeigerformalismus eingeführt ist, sieht das Curriculum die Bestimmung der Basislänge λ mit einem Interferometerexperiment vor. Durch Beleuchtung der Seifenhaut mit verschiedenfarbigen Lampen wird außerdem erarbeitet, dass zu andersartigem Licht - in Entsprechung der verschiedenen gesehenen Farben - auch eine andere Basislänge λ gehört. Schließlich mag man zu gängigen Beugungsexperimenten übergehen und beispielsweise die Beugung am einfachen Spalt, am Doppelspalt oder am Gitter untersuchen. Mittels entsprechender Programme können so im Zeigerformalismus nicht nur die Erscheinungen einfacher Experimente zur FRAUNHOFERbeugung, sondern auch FRESNELbeugungserscheinungen errechnet und mit den Ergebnissen der Experimente verglichen werden. Hier nähern sich die Arbeiten ERBS denen von BADER an (BADER 1996, DORN 1996).

Der zu einem Unterrichtskonzept ausgearbeitete Übergang vom Lichtwegkonzept hin zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells findet sich bei WERNER (2000).

3.3 Das Konzept optischer Wege

3.3.1 Einleitendes Beispiel: Der rotierende Würfel

Ein aus Holzleisten gebauter Würfel rotiert, an einem Faden hängend, vor einer Leinwand. Sein Abstand zur Leinwand beträgt ca. 0,5 m, die Würfelkanten haben eine Länge von ca. 20 cm und die Leisten selbst einen quadratischen Querschnitt von 8 - 10 mm. Eine senkrechte

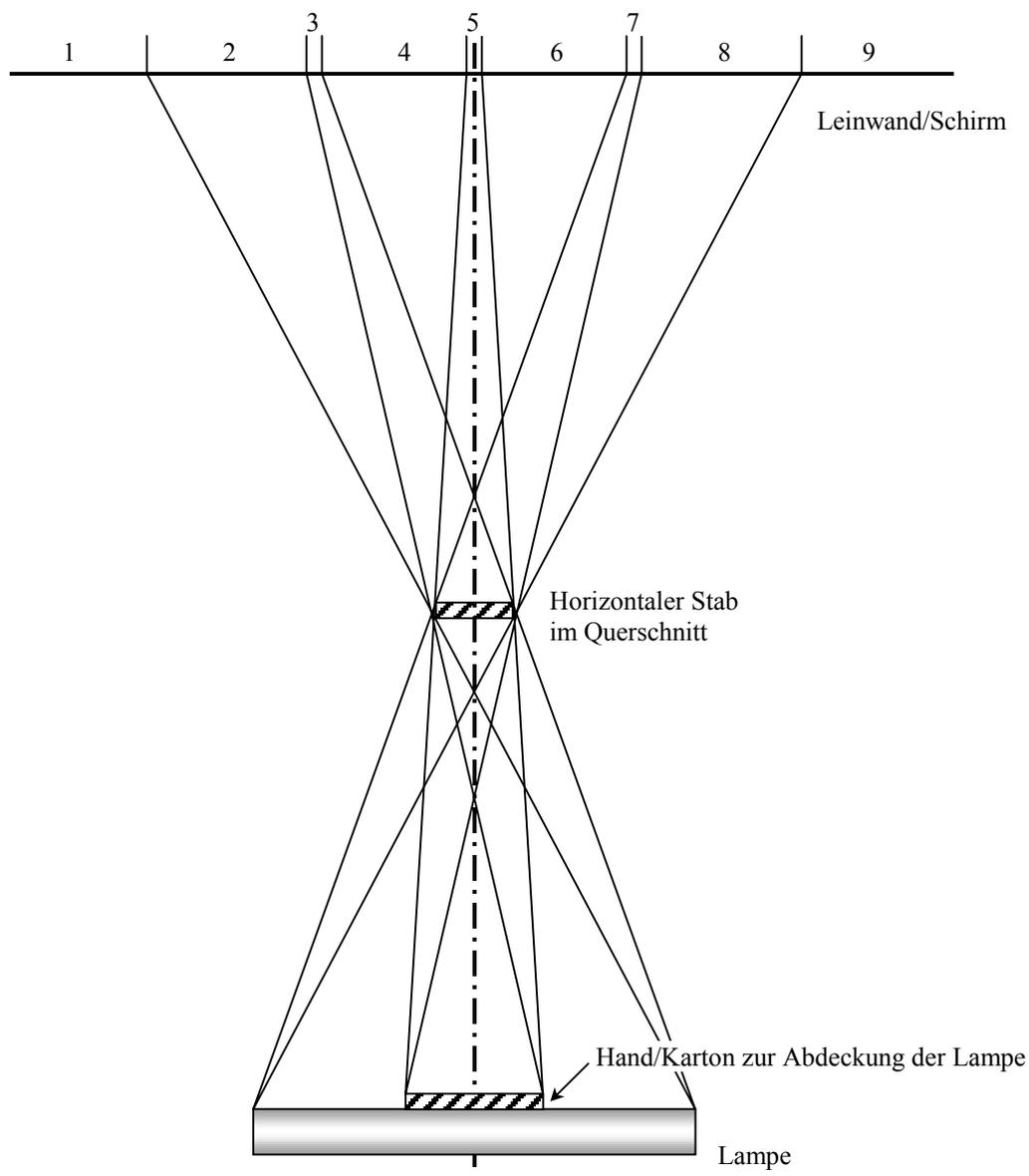


Abb. 8:

Optische Wege als Beschreibung der Grenzen, an denen sich die Beleuchtungssituation qualitativ ändert. Die Abbildung zeigt eine um 90° gedrehte Seitenansicht des Versuchsaufbaus.

Stablampe (handelsübliche Leuchtstoffröhre) beleuchtet in einem Abstand von 3 - 5 m die Szenerie. Während der Würfel rotiert, erscheinen die jeweils senkrechten Schatten der Holzleisten relativ scharf und deutlich, die schrägen Schatten sind hingegen heller, weniger deutlich und erstrecken sich in vergleichsweise hoher Breite über die Leinwand (SCHÖN 1997). Hält man nun die Hand oder einen schwarzen Karton vor die Mitte der Stablampe und bewegt diese leicht hoch und runter, so bemerkt man, wie innerhalb des vorigen Schattenbildes eine

<i>Bereich des Schirmes</i>	<i>Konfiguration, die ein Beobachter im entsprechenden Bereich des Schirmes erblickt (eingebundene Perspektive)</i>	<i>Helligkeit, die man auf dem Schirm sieht (abgelöste Perspektive)</i>
1	Ein Teil der Lampe wird von dem Karton verdeckt	Starke Helligkeit
2	An einem Ende der Lampe beginnt an der Grenze von 1 zu 2 auch der horizontale Stab die Lampe zu verdecken. An der Grenze von 2 zu 3 liegen der verdeckende Karton und der horizontale Stab im Blickfeld nebeneinander. Der horizontale Stab deckt eine Seite der Lampe vollständig ab.	Die Helligkeit nimmt in Richtung 3 ab. Wenn im Blickfeld der verdeckende Karton und der horizontale Stab nebeneinander liegen, ist die dunkelste Stelle erreicht.
3	Der horizontale Stab deckt weiterhin eine Seite der Lampe vollständig ab. Teilweise liegt der horizontale Stab vor dem Karton.	Über diesen Bereich erstreckt sich die dunkelste Stelle.
4	Der horizontale Stab liegt teilweise vor dem verdeckenden Karton, er deckt aber die eine Seite der Lampe nicht mehr vollständig ab. An der Grenze von 4 und 5 liegen an einer Seite die Kanten von Karton und Stab in einer Flucht, an der anderen Seite verdeckt der Stab noch einen kleinen Teil der Lampe.	Es wird in Richtung 5 wieder heller.
5	Der horizontale Stab verdeckt an beiden Seiten kleine Teile der Lampe.	Es bleibt annähernd gleich hell.
6	vgl. 4	
7	vgl. 3	
8	vgl. 2	
9	vgl. 1	

Tab. 1:

Zusammenhang zwischen der Konfiguration, die ein Beobachter von dem entsprechenden Bereich des Schirmes aus erblickt, und der Helligkeit, die man dort auf dem Schirm sieht.

helle Struktur erscheint, die ebenfalls wie der Würfelschatten geformt ist. Naiv bezeichnet tritt ein „heller Schatten“ auf, differenzierter formuliert wird der Würfelschatten von einem helleren Bereich in zwei dunklere Bereiche unterteilt.

Für eine differenziertere Analyse ersetzt man den Würfel durch einen horizontalen Stab, dessen Schatten jetzt ebenfalls durch einen hellen Streifen unterteilt wird (*Abb. 8*). Bewegt man die Hand vor der Lampe nach unten, so wandert der helle Streifen nach oben und umgekehrt. Ein weiterer Beobachter stellt sich vor die Leinwand, so dass sich der helle Streifen auf Höhe seiner Augen befindet. Bewegt man jetzt die Hand vor der Lampe nach oben und unten, so wandert der helle Streifen entweder in Richtung Mund oder in Richtung Stirn auf dem Gesicht des Beobachters. Gleichzeitig kann dieser melden, was er im Einzelnen sieht.

Sofern der helle Streifen auf Augenhöhe des Beobachters liegt, sieht der Beobachter die Hand vor der Stablampe nicht, jedoch die beiden Abschnitte der Lampe, die sich oberhalb und unterhalb der verdeckenden Hand befinden. Unterteilt werden diese beiden Abschnitte durch den horizontalen Stab, den er im Raum vor der Lampe erblickt und der zugleich die Hand vor der Stablampe verdeckt. Verläuft hingegen der helle Streifen über seine Stirn, so sieht er die Stablampe durch zwei Dinge verdeckt: einerseits durch den horizontalen Stab und andererseits durch die Hand vor der Stablampe, die für ihn unterhalb des horizontalen Stabes erscheint. Er erblickt demnach weniger Helles der Lampe als zuvor. Entsprechendes ergibt sich, wenn der helle Streifen unterhalb seiner Augen liegt; hier sieht er die verdeckende Hand oberhalb des horizontalen Stabes.

Mit diesen Meldungen kann der Versuchsaufbau gemäß *Abbildung 8*, wie in *Tabelle 1* erläutert, analysiert werden.

Die in *Abbildung 8* eingezeichneten Linien geben Grenzen an, an denen sich für einen Beobachter die Konfiguration, welche er erblickt, ändert. An den Grenzen selbst liegen Begrenzungen der Versuchsgegenstände, hier der abdeckende Karton und der horizontale Stab, in einer Flucht. Diesseits und jenseits solcher Grenzen ergibt sich eine qualitativ andere Beleuchtungssituation. Die Rechtfertigung, einzelne Begrenzungen, die in einer Flucht gesehen werden, durch eine gerade Linie zu verbinden, entnimmt man der Alltagserfahrung und damit nicht zuletzt eine Kohärenz von Wahrnehmungen des Seh- und Tastsinns, welche sich im Laufe der frühkindlichen Entwicklung einstellt.

Mit Hilfe dieser geraden Linien kann man den Versuch ordnen. Sie sind gedankliche Elemente, die Beobachtungshandlungen eines in den Versuch eingebundenen Beobachters auf die Beobachtungen selbst beziehen. In der abgelösten Perspektive charakterisieren diese Linien Grenzsituationen, an denen sich die räumlichen Bedingungen und entsprechend die sich ergebenden Beleuchtungerscheinungen qualitativ ändern. Damit erweisen sich diese Linien als gedankliche Ordnungselemente, die dem Versuch selbst immanent sind. Sie nehmen auf die Geometrie des Versuchsaufbaus Bezug.

Solche der Geometrie des Versuchsaufbaus immanente gedankliche Ordnungselemente werden *optische Wege* genannt. Sie machen keine Aussagen über ein sich ausbreitendes Licht, sondern gehen, im Rekurs auf die Arbeiten zur phänomenologischen Optik von MACKENSEN, MAIER und OHLENDORF (MACKENSEN 1998, MAIER 1993), von einer phänomenologischen Beschreibung der Ansichten eines eingebundenen Beobachters oder der beobachteten Helligkeiten auf einem Schirm im abgelösten Versuch aus. Sie ordnen die beschriebenen Helligkeiten oder Ansichten nach Maßgabe geometrischer oder räumlicher Bedingungen.

3.3.2 Operationale Definition optischer Wege

Optische Wege werden im Rahmen dieser Arbeit, wie im vorangegangenen Kapitel anhand eines Beispiels erläutert, als den Erscheinungen immanente geometrische Ordnungselemente eingeführt. Diese Ordnungselemente zeigen sich als eine vielen optischen Erscheinungen gemeinsame Struktur, wenn man verschiedene Versuche in Erscheinungsreihen gruppiert. Damit sind optische Wege ein gedankliches Element, welches im Rahmen einer phänomenologischen Optik oder eines rationalen Empirismus in der Erkenntnisbildung auftreten kann (Kapitel 2.3). Es geht auf einen epistemologischen Ansatz zurück, der den Zusammenhang zwischen dem Wie der Erscheinung und den dafür maßgeblichen Bedingungen rein ausspricht und Ordnungen, die im Zusammenhang der Erscheinungen selbst gegeben sind, aufsucht.

Der epistemologische Grundzug dieses Ansatzes zeichnet sich durch seine Nähe zur Urteilsbildung in der Quantenphysik aus: Der Inhalt der Beobachtung ergibt sich nicht als Überprüfung von Sachverhalten, die im Prinzip als unabhängig von der aktuellen Beobachtung, d.h. an sich existierend, vorgestellt werden; also von Sachverhalten, zu denen durch den Akt der Beobachtung nichts Wesentliches hinzukommt und die man lediglich bezeichnen muss, damit

sie kommunizierbar sind. Inhalt der Beobachtung ist vielmehr, was in geordneten Mess- und Beobachtungshandlungen als zeitliche und räumliche Abfolge sich gegenseitig bedingender Erscheinungen tätig erzeugt wird. Verkürzt gesagt lernt man die Bedingungen der Erscheinungen nicht kennen, indem man sie vorfindet, sondern indem man sie herstellt.

Ein Ziel dieser Arbeit ist, die phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege als einen Einstieg in oder als eine Vorbereitung für die Quantentheorie zu wählen. Damit werden die optischen Wege so eingeführt, dass den Schülerinnen und Schülern durch die Art der Einführung bewusst wird, wie diese Strukturelemente sich ergeben, wenn man in einer Fülle optischer Versuche auf gleiche Weise bestimmte Bedingungen herstellt - oder allgemeiner gesprochen: die Art der Einführung soll die oben umrissene Nähe zur Quantentheorie anlegen. Das entsprechende Bedingungsgefüge und das gedankliche Strukturelement sollen so für die Lernenden lediglich zu zwei Aspekten eines Ganzen werden. Das bedeutet eine solche operationale Definition des optischen Weges, dass die Operation oder der experimentelle Eingriff ein Aspekt und die gedankliche Ordnung ein anderer Aspekt der Sache sind.

Die in dieser Arbeit schon zitierte Äußerung VARELAS, Kognition sei verkörpertes Handeln (PÖRKSEN 2002, S. 115), wird im Rahmen einer Analyse der Seh Wahrnehmungen besonders deutlich: Man sieht Dinge mit einer bestimmten Winkelgröße im Gesichtsfeld, die man über die entsprechende Winkelgröße eigener Körperteile auf seinen Körper mit dessen Ausmaßen bezieht und so letztlich auch mit einer körperlich aufgefassten Umwelt und deren Maßen in Verbindung bringt. Streng genommen ist selbst der Begriff der Winkelgröße nicht ohne den Rekurs auf Körperwahrnehmungen zu denken.

Verkürzt und zusammenfassend formuliert heißt das: die geometrische Ordnung von Seh Wahrnehmungen geht stets darauf zurück, dass man den Seheindruck in einer Kohärenz von Seh- und Tastwahrnehmungen ausbildet. Diese Tatsache ist im Rahmen der phänomenologischen Optik schon viel gewürdigt worden und findet sich nun, wie schon aus obigem Beispiel hervorgeht, auch in der operationalen Definition des optischen Weges wieder: Dort bewegt sich ein Beobachter so, dass er in einer Flucht steht und damit die Veränderungen seines eigenen Körpers mit den Seheindrücken der gegenseitigen Verdeckung von Dingen korreliert. Im abgelösten Versuch heißt das, dass man Dinge an einer Stelle aufstellt, an der sie gerade noch

nicht bereits vorliegende Helligkeitsübergänge oder Schattengrenzen verändern. Dies soll nun im Einzelnen erläutert werden.

Will man verschiedene Fluchtstangen in einer Flucht aufstellen, muss man diese bei einäugigem Blick so einweisen, dass bei leichten Bewegungen des Kopfes sich alle im gleichen Moment verdecken. Man sieht dann nahe Fluchtstangen schneller als ferne bei entsprechenden Kopfbewegungen aufeinander zu oder auseinander laufen; befindet sich das Auge aber mit den rechten oder linken Kanten der Stangen selbst in einer Flucht, dann erblickt man nur die vorderste Fluchtstange, die alle anderen Stangen verdeckt.

Erweitert man diesen Versuch, indem man in der Flucht einer Seite dieser Stangen hinter der letzten Stange noch ein kleine, aber helle Lampe aufstellt, so liegen die Schattengrenzen auf dieser Seite alle selbst auch in der Flucht. Diese Tatsache wird man auch bemerken, wenn man sich nicht selbst als Beobachter, der in der Flucht steht, in die Situation einbindet, sondern davon abgelöst auf das Ensemble der Fluchtstangen und der Schattengrenzen blickt.

Die gedankliche Verbindung beider Situationen macht deutlich: Die Dinge, die in einer Flucht gesehen werden, legen die Richtung fest, in die wir blicken. Sie definieren einen Blickweg. Indem wir blicken, wird uns die geradlinige Verbindung zwischen den Dingen bewusst. Die Schattengrenzen, an denen der Übergang vom Blick auf die Lampe zur Verdeckung der Lampe für einen Beobachter stattfindet, fallen mit diesen Blickwegen zusammen. Damit kann der Eingriff in einen Beleuchtungs- und Blickzusammenhang, der mit dem Aufstellen der Flucht durchgeführt wurde, durch einen geraden Weg beschrieben werden. Da es sich um einen elementaren optischen Zusammenhang handelt, mag dieser Weg optischer Weg genannt werden. Immer dann, wenn in der Optik in diesem Sinne Blickwege oder Schattengrenzen untersucht werden, kann man von optischen Wegen sprechen. Sie stellen insbesondere die Verbindung zu Tastwahrnehmungen oder dem Tastraum her, da sie implizit die Frage enthalten, wie Gegenstände aufgestellt werden müssen, damit ihre Kanten in einer Flucht gesehen werden oder damit ihre Schattengrenzen auf einer gemeinsamen Geraden liegen. Da Lampen immer eine gewisse Ausdehnung haben oder Blickpositionen nur mit einer gewissen Genauigkeit festgelegt werden können, zeichnet sich diese Fragestellung durch einen gewissen Grad an Idealisierung aus. Optische Wege beinhalten eine begriffliche Idealisierung. Es gilt:

Optische Wege ergeben sich in eingebundenen Versuchen, wenn man die möglichen Sichtverbindungen aufsucht, in abgelösten Versuchen, wenn man die möglichen Schattengrenzen ver-

folgt. Sie sind gedankliche und idealisierende Elemente, mit denen die räumlichen Bedingungen eines optischen Versuchsaufbaus auf die sich ergebenden Erscheinungen bezogen werden.

Den Begriff des optischen Weges findet man u.a. bei MAIER (MAIER 1984), der ihn als Überschrift für eine Zusammenschau unterschiedlicher Aspekte der geometrischen Optik unter Einbeziehung des FERMAT-Prinzips verwendet. Im Zusammenhang des FERMAT-Prinzips wird oft der Begriff der optischen Weglänge im Gegensatz zur räumlichen Weglänge eingeführt (HECHT 2001). Dieser Begriff enthält implizit den Begriff des optischen Weges. - Der im Rahmen dieser Arbeit eingeführte Begriff des optischen Weges steht in enger Verbindung zu den soeben zitierten Arbeiten. Er betont aber zusätzlich einen operationalen Aspekt und setzt rein an den geometrischen Bedingungen des Versuchsaufbaus an. Damit muss über das Licht keinerlei Aussage getroffen werden; die Erscheinungen sind aber trotzdem geometrisch zu ordnen und können in einen erklärenden Zusammenhang gestellt werden.

Im Unterricht bietet sich die Einführung der optischen Wege über Schattengrenzen besonders an. Auf diesem Hintergrund kann man die phänomenologische Behandlung der Photometrie, wie sie MACKENSEN für die 12. Klasse vorschlägt, gut aufgreifen (siehe Kapitel 3.1.1). Der Bezug zur modellfreien Optik bzw. Optik der Bilder von MACKENSEN, MAIER und OHLENDORF soll im folgenden Kapitel hergestellt werden.

Auf der rein geometrisch-formalen Ebene hat der optische Weg eine vergleichbare Struktur zum Lichtweg, wie er im Rahmen des Lichtwegkonzeptes von ERB und SCHÖN eingeführt wird. Dort wird die formale geometrische Struktur aber in Zusammenhang mit der Modellvorstellung eines sich ausbreitenden Lichtstromes gesehen, worauf die hier vorgenommene Definition des optischen Weges explizit verzichtet. Damit besteht eine formale, nicht aber inhaltliche Ähnlichkeit. Dieser inhaltliche Unterschied zieht im Aufbau des Curriculums allerdings deutliche Unterschiede nach sich: Im Lichtwegkonzept wird bei der Behandlung der Brechung und insbesondere der Linse aus der Theorie heraus z. B. die Linsenform errechnet und im Anschluss werden die Überlegungen experimentell überprüft. Die Physik wird als theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft behandelt. Bei einem phänomenologischen Ansatzpunkt steht am Anfang das Experiment, in dem genannten Beispiel demnach die Ansichten beim Blick durch

die Linse. Erst mit der Ordnung der Erscheinungen treten gedankliche Fragestellungen, wie der Verlauf optischer Wege, hinzu.

3.3.3 Curriculare Integration der optischen Wege in die modellfreie Optik

VON MACKENSEN

Wie in vorausgehenden Kapiteln bereits dargestellt, sieht das für die Waldorfschulen entwickelte Curriculum von MACKENSEN in den Klassen 6 - 8 einen phänomenologischen Optikunterricht vor. In der 12. Klasse wird die Optik erneut aufgegriffen und vertieft. Dabei kommen auch verschiedene epistemologische Gesichtspunkte zur Sprache mit dem Ziel, das Methodenbewusstsein zu fördern. Die methodische Referenz bleibt aber weiterhin ein rationaler Empirismus oder phänomenologischer Ausgangspunkt.

Da die hier vorgestellte phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege aus dem Physikunterricht der Waldorfschulen heraus entwickelt und dort auch erprobt wurde, soll an dieser Stelle der Zusammenhang der optischen Wege zu den curricularen Arbeiten MACKENSENS hergestellt werden. Die Verbindung zum Lichtwegkonzept von ERB und SCHÖN ist prinzipiell auch denkbar, sofern man auf die Modellvorstellung eines sich ausbreitenden Lichtstromes verzichtet. Das wird aber erst eine Rolle spielen, wenn die Beugung im Konzept optischer Wege schrittweise zu entfalten ist.

Die Integration des Konzeptes optischer Wege bietet sich bei dem von MACKENSEN entwickelten Curriculum in der 12. Klasse an. Dort dient es als ein Element, an dem die Methodenkompetenz weiterentwickelt werden kann und an dem es außerdem möglich ist, die phänomenologische Erklärung über Ordnungselemente innerhalb von Erscheinungsreihen zu üben.

Als stufenweisen Aufbau schlägt MACKENSEN für den Optikunterricht der 12. Klasse folgende Abfolge vor:

- Photometrie und Schattenlehre
- Erscheinungen sowohl am ebenen Spiegel als auch an Hohl- und Wölbspiegeln
- Hebung und Prisma
- Linse und optische Abbildung

Wie bereits oben erläutert, bietet sich die Einführung optischer Wege im Rahmen von Schattenversuchen an. Behandelt man die Photometrie vor den Schattenerscheinungen, wird man dort nur von Blickwegen sprechen, wenn man durch Peilungen die Winkelgröße unterschiedlich weit entfernter Lampen im Gesichtsfeld vergleicht. Hat man hingegen vor der Behandlung der Photometrie über Schattenerscheinungen die optischen Wege schon eingeführt, trägt dieses Konzept dann auch in der Photometrie.

Bei den Erscheinungen am Spiegel und beim Einblick in mit Wasser gefüllte Aquarien lösen sich gesehene Ansichten von ihrer gewohnten Tastlage, Seh- und Tastraum fallen auseinander. Hier besteht nun die Besonderheit in dem von MACKENSEN beschrifteten Weg darin, dass er die Ansichten im Seh- und Tastraum vollkommen gleichwertig behandelt. So gelingt es ihm, im Rahmen dieser Gleichwertigkeit beider Räume das Spiegel- und Brechungsgesetz abzuleiten und dort seinen phänomenologischen Ausgangspunkt durchzuhalten.

Die Integration optischer Wege würde an dieser Stelle die Gleichwertigkeit von Seh- und Tastraum zu Gunsten einer Dominanz des Tastraumes aufbrechen, müsste man doch vor allem die Frage stellen, wo im Tastraum Gegenstände aufzustellen wären, damit sie eine Beobachterin oder ein Beobachter in einer Flucht erblickte. Diese Frage scheint an dieser Stelle gerade wegen der didaktischen Eleganz, welche die völlige Gleichwertigkeit beider Räume mit sich bringt, noch nicht richtig platziert, vielmehr ist es sinnvoll, durch den gegenseitigen Bezug der Seh- und Tastwege aufeinander das Hebungs- bzw. Brechungsgesetz abzuleiten (Kapitel 3.1.3).

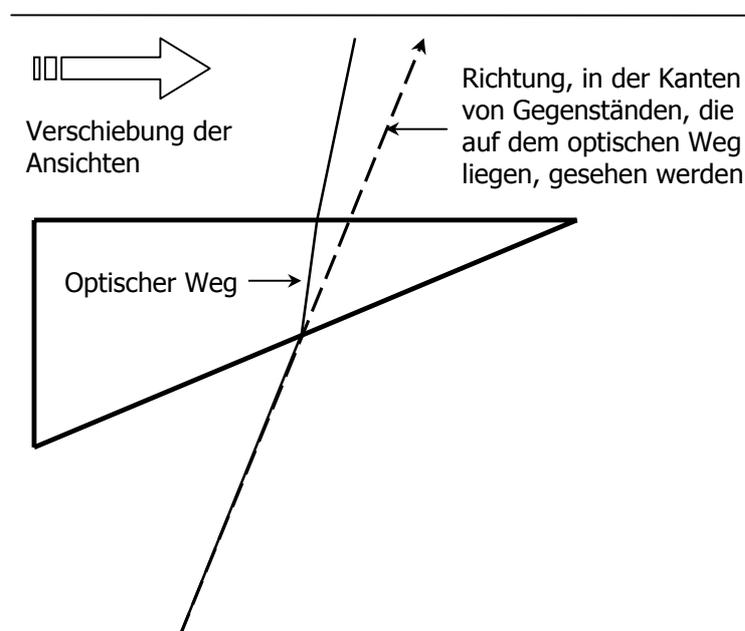


Abb. 9:

Erklärung der Verschiebung von Ansichten beim Durchblick durch ein Prisma mittels optischer Wege.

Erst wenn man die Verschiebung von Ansichten am Prisma behandelt, wird der Rekurs rein auf Seh- und Tastwege aufwendig und schwerfällig, allein schon deshalb, weil man zwischen

Tastwegen im und hinter dem Prisma dann unterscheiden müsste. Hingegen erweisen sich jetzt optische Wege im Rahmen der phänomenologischen Optik als besonders erklärungs-mächtig.

Abbildung 9 zeigt einerseits für den streifenden Einblick in ein Prisma, wie man vor und hinter dem Prisma, also im Tastraum, Stangen aufstellen müsste, damit diese von einem Beobachter beim Durchblick durch das Prisma in einer Flucht gesehen werden. Der Beobachter selbst schaut in die Richtung, welche die Fluchtstangen vor dem Prisma festlegen. In dieser Richtung sieht er die Dinge, die hinter dem Prisma in der beschriebenen Flucht stehen. Damit wird unmittelbar einsichtig, dass er sie gegenüber ihrer Tastlage verschoben erblickt und dass außerdem die Verschiebung der Dinge mit zunehmendem Abstand von der hinteren Prismenwand größer wird. Eine weitere Betrachtung für zwei Prismen unterschiedlich großer Prismenwinkel zeigt außerdem, dass mit der Vergrößerung des Prismenwinkels eine Zunahme der Verschiebung von Ansichten einhergeht.

Für einen Optikunterricht, der einer phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege voran gehen soll, wird folgender Aufbau vorgeschlagen:

<i>Inhalte:</i>	<i>Art der Thematisierung:</i>
Photometrie und Schatten	Aus Blickwegen und Schattengrenzen wird der Begriff des optischen Weges entwickelt.
Spiegelercheinungen: ebener Spiegel und Hohl- bzw. Wölbspiegel.	Seh- und Tastraum werden aufeinander bezogen. Hohl- bzw. Wölbspiegel: Auseinanderfallen von perspektivischer und stereoskopischer Entfernung. Keine Behandlung mittels optischer Wege. Siehe auch MACKENSEN (1998).
Hebung bzw. Brechung: Blick in ein mit Wasser gefülltes Aquarium.	Der Spiegelraum und der Raum gehobener Ansichten werden zuerst aufeinander und dann auf den Tastraum bezogen. Herleitung des Hebungsgesetzes. Siehe auch Kapitel 3.1.3.
Hebung bzw. Brechung: Prisma.	Behandlung im Konzept optischer Wege.
Hebung bzw. Brechung: FERMAT-Prinzip.	Siehe folgendes Kapitel. Das Konzept optischer Weg wird in den Kontext des FERMAT-Prinzips gestellt.
Hebung bzw. Brechung: Vom Prisma zur Linse.	Siehe Kapitel 3.1.3 und Kapitel 4.3.2

3.3.4 Das Fermat-Prinzip im Kontext optischer Wege

Das FERMAT-Prinzip in ein Curriculum zum Optikunterricht aufzunehmen bietet sich aus mehreren Gründen an: Einerseits können dadurch viele Erscheinungen mittels eines Prinzips formuliert werden. Das unterstützt nicht nur die Wahrnehmung der Physik als ein zusammenhängendes Gedankengebäude, sondern fördert auch kumulative Lernprozesse (WEBER 2003). Andererseits bestimmt das FERMAT-Prinzip tatsächlich im Experiment vorgefundene Situationen über den Vergleich mit möglichen anderen Situationen. Damit greift es eine grundlegende Geste des Erkenntnisprozesses auf, wo über das Mögliche von dem Wirklichen ein Durchgang zum Notwendigen erreicht wird. Diese beispielsweise von SCHILLER formulierte Geste (Kapitel 2.3.1) kommt hier mit besonderer Klarheit zum Vorschein.

Im Gegensatz zum Lichtwegkonzept werden in dem hier vorgeschlagenen Curriculum die optischen Wege nicht von Anfang an in den Kontext des FERMAT-Prinzips gestellt. So können zunächst die Erscheinungen in größeren Erscheinungszusammenhängen behandelt werden und der rein geometrische Aspekt, den die optischen Wege betonen, bleibt ein Aspekt unter vielen. Erst im Rahmen einer Unterrichtssequenz, die der Behandlung der Beugung im Konzept optischer Wege unmittelbar vorangeht, behandelt man das FERMAT-Prinzip und die Linse. Sie bilden eine entscheidende Voraussetzung für die Untersuchung der Beugungsercheinungen. Gleichzeitig werden mittels des FERMAT-Prinzips zuvor besprochene Inhalte in einen größeren Rahmen gestellt.

Im Lichtwegkonzept wird mit dem Übergang von den Spiegelercheinungen zur Brechung als Gesetzmäßigkeit für die Lichtwege nicht mehr das Prinzip des kürzesten Lichtweges formuliert, sondern für die Ausbreitung des Lichtes kommt jetzt zum Tragen, dass es im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen solche Wege nimmt, für die es die kürzeste Zeit benötigt. Diese Aussage hält ERB als FERMAT-Prinzip fest. Da das Lichtwegkonzept von der Modellvorstellung eines sich ausbreitenden Lichtstromes ausgeht, bietet sich dieser Schritt zwanglos an. Er wird allerdings damit erkauft, dass die Messung der Lichtgeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt problematisiert und behandelt werden muss, zu dem noch nicht ein Verständnis der vorgeschlagenen experimentellen Apparaturen voll als Handwerkszeug zur Verfügung steht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das FERMAT-Prinzip nicht über kürzeste Zeiten, welche das Licht im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen benötigt, formuliert werden. Da ein Aus-

gangspunkt dieser Arbeit die Frage bildet, inwieweit durch eine phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege ein Verständnis der Quantentheorie gefördert werden kann, bietet es sich gerade *nicht* an, durch die Modellvorstellung des sich bewegenden Lichtstromes bei den Schülern die Vorstellung anzuregen, Licht breite sich längs der optischen Wege aus. Dann müsste bei einer Behandlung quantentheoretischer Fragestellungen, insbesondere bei sogenannten Ein-Photonen-Experimenten, gerade diese Vorstellung wieder mühsam aufgelöst werden. Vielmehr wird die Erklärungsmächtigkeit der optischen Wege gerade auf einen rein geometrischen Kontext begrenzt. Dies zieht nach sich, dass auch das FERMAT-Prinzip in einem geometrischen Kontext belassen werden muss. Dies ist möglich und wurde von FERMAT selbst schon gesehen.

FERMAT hat das nach ihm benannte Prinzip unter dem Einfluss seiner Zeitgenossen auf verschiedene Weisen formuliert (WEINRICH 1998). Insbesondere hat er den geometrischen Aspekt seines Prinzips wohl immer deutlich im Blick gehabt, wenn er nicht zuletzt in seinem eine lange Diskussion abschließenden Brief vom 21.5.1662 an CLERSELIERS formuliert: *„Ich habe ... zu wiederholten Malen gesagt, dass ich nicht behaupte und auch nie behauptet habe, in die Geheimnisse der Natur eingeweiht zu sein, deren Wege dunkel und verborgen sind. Ich habe es nie unternommen, in sie einzudringen, ich habe der Natur bezüglich der Lichtbrechung bloß eine bescheidene Hilfe geometrischer Art angeboten, in der Annahme, sie käme ihr zustatten“* (SIMONY 1990, S. 232).

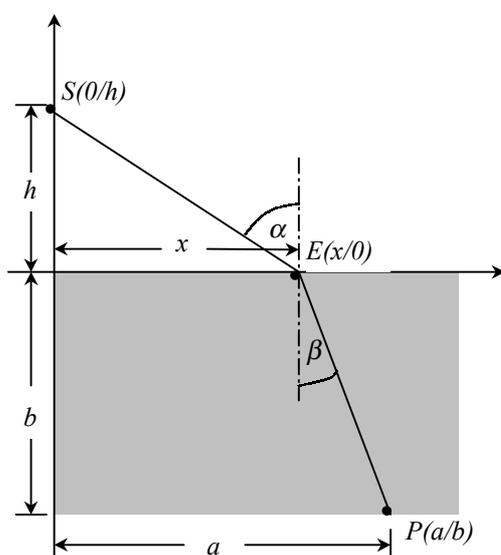
Eine Idee, von der FERMAT bei der Formulierung seines Prinzips ausgeht, beginnt für die Brechung mit der Überlegung, dass dort ein Minimalprinzip nicht für die (geometrische oder räumliche) Länge des Lichtweges gelte, sondern vielmehr, dass der vom Licht beim Durchgang durch die Medien zu überwindende Widerstand insgesamt minimal sein müsse (WEINRICH 1998, S. 131). In der heutigen Terminologie lassen sich die Überlegungen FERMATS dahingehend zusammenfassen, dass dann ein Wegabschnitt in Wasser gegenüber einem Wegabschnitt in Luft mit der Brechzahl n multipliziert werden muss, um diesem größeren Widerstand gerecht zu werden.

In der Formulierung des Brechungsgesetzes gemäß $n = \frac{t}{s}$ findet man den soeben referierten Gedanken wieder. Durch Umformung ergibt sich $t = n \cdot s$, wobei t der Tastweg und s der Sehweg im dichteren Medium sind. Da die optischen Wege auf den Verlauf von Schattengrenzen bzw. auf entsprechend aufzustellende Fluchten rekurren, fallen sie, verwendet man

die Bezeichnungen des Brechungsgesetzes, mit dem Tastweg t zusammen. Die Annahme FERMATS erscheint sinnvoll, wenn man bedenkt, dass der Blick in Richtung des Sehweges s die Dinge nicht in ihrer zu ertastenden Tiefe erfasst. Er gleitet an der Wasseroberfläche gewissermaßen ab. Diesen größeren „Widerstand“ kann man durch die Multiplikation mit der Brechzahl n erfassen.

Im Gang des Unterrichtes wird man die Ideen FERMATS kurz darstellen und im Anschluss ggf. die Ableitung des Brechungsgesetzes aus seinem Prinzip mit Hilfe der Differentialrechnung entwickeln. Für die optischen Wege tritt als neue Eigenschaft auf, dass für die einzelnen Wegabschnitte eines optischen Weges eine Multiplikation oder „Gewichtung“ mit der Brechzahl n hinzukommt. Die räumliche und optische Weglänge fallen auseinander. - Diese Gewichtung ist allerdings nur von Bedeutung, sofern man die optischen Wege im Kontext des FERMAT-Prinzips sehen will.

Eine rein auf die räumlichen Bedingungen zurückgehende Ableitung der Brechung bzw. Hebung aus dem FERMAT-Prinzip sieht dann gemäß *Abbildung 10* wie folgt aus.



$$\begin{aligned}\overline{SP} &= \overline{S0} + n \cdot \overline{0P} \\ \overline{SP} &= \sqrt{x^2 + h^2} + n \cdot \sqrt{(a-x)^2 + b^2} \\ \frac{d(\overline{SP})}{dx} &= \frac{2x}{2\sqrt{x^2 + h^2}} + n \cdot \frac{2(a-x) \cdot (-1)}{2\sqrt{(a-x)^2 + b^2}} \\ \frac{d(\overline{SP})}{dx} &= 0 \\ 0 &= \frac{x}{\overline{S0}} - n \cdot \frac{a-x}{\overline{0P}} \\ 0 &= \sin \alpha - n \cdot \sin \beta \\ n &= \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\end{aligned}$$

Abb. 10:

Anwendung des FERMAT-Prinzips auf die Brechung.

In dieser Ableitung erhält man das Brechungsgesetz aus der Forderung, dass die Funktion $\overline{SP}(x)$ einen stationären Punkt hat; ob es sich dabei um ein Maximum, Minimum oder einen

Wendepunkt mit waagrechtter Tangente handelt, wird nicht untersucht. Betrachtungen über die optische Weglänge in der Umgebung des stationären Punktes ergeben, dass es sich um ein Minimum handelt.

Die Ableitung des FERMAT-Prinzips mit Hilfe der Differentialrechnung kann hier vorgeschlagen werden, da dieses mathematische Handwerkszeug in einer 12. Klasse zur Verfügung steht. Muss man hingegen andere curriculare Vorgaben erfüllen, ist es möglich, auf den Vorschlag von ERB zurückzugreifen (*Abb. 7*) und mittels geeigneter Lineale die optischen Wege auszumessen. Man wird aber an Stelle der Zeitlineale zwei Maßstäbe wählen, von denen einer die entsprechende „Gewichtung“ durch Multiplikation mit der Brechzahl n berücksichtigt. Unter dem formalen Aspekt sind solche Maßstäbe mit denen ERBS identisch.

In einer heute oft gebräuchlichen Formulierung des FERMAT-Prinzips, wird darauf verzichtet, dieses als Minimalprinzip für eine gewisse Auswahl von Experimenten, bei denen es gültig ist, zu fassen. Vielmehr fordert man nur noch, dass die optische Weglänge bezüglich der Variationen eines Weges stationär ist. So gefasst schließt das FERMAT-Prinzip selbst die optische Abbildung mit ein. Ob man in der Schule allerdings bis zu dieser Aussage voranschreitet, muss im Blick auf die Lerngruppe sorgfältig abgewogen werden.

An die Behandlung des FERMAT-Prinzips schließt sich die Linse an. Das entsprechende Vorgehen wird an geeigneter Stelle innerhalb des Curriculums zur Beugung dargestellt (Kapitel 4.3.2).

4 Die Beugung im Konzept optischer Wege – Kerncurriculum

Das Curriculum zur Beugung behandelt die FRAUNHOFERSCHE Beugung und gliedert sich in ein Kerncurriculum und in Erweiterungsmodule, die optional im Anschluss an das Kerncurriculum unterrichtet werden können. Die durch das Kerncurriculum thematisierten Inhalte, wie sie in diesem Kapitel entfaltet werden, sind vom Schwierigkeitsgrad her tendenziell leichter als die Inhalte der Erweiterungsmodule; sie orientieren sich an den Anforderungen eines Grundkurses. Dies schließt jedoch nicht aus, dass sich auch bereits aus den Inhalten des Kerncurriculums anspruchsvolle Aufgaben für den Leistungskurs ableiten lassen.

Der Aufbau des Curriculums setzt voraus, dass die Brechung bzw. Hebung und die Linsenabbildung im Konzept optischer Wege unterrichtet wurden und dass das FERMAT-Prinzip bekannt ist (Kapitel 3.3.4). Im vorangegangenen Kapitel findet sich als ein Vorschlag, von der modellfreien Optik MACKENSENS für die 12. Klasse auszugehen (Kapitel 3.3.3) und dort das Konzept optischer Wege zu integrieren. Im Anschluss an die Behandlung der Linsenabbildung kann dann die Beugung folgen. Will man hingegen von dem Lichtwegkonzept von ERB und SCHÖN ausgehen, so mag sich das Curriculum an den Unterrichtsvorschlag „Geometrische Optik“ (Kapitel 3.3.2) angliedern lassen. Man wird dann aber an Stelle von optischen Wegen von Lichtwegen sprechen. Hier ist eine Adaption problemlos möglich, wenn auch das vorgestellte Curriculum von einem stärker phänomenologischen Ansatzpunkt ausgeht: dem Konzept optischer Wege.

4.1 Einstieg: Freihandversuche

Den Einstieg in das Thema Beugung bilden Freihandversuche, innerhalb derer die Bilder studiert werden, die sich beim Anblick scharfer Kontraste durch einen fein strukturierten Zwischenraum ergeben. Sie gehen auf Arbeiten von MAIER (MAIER 1981, 1984, 1993), KOPPELMANN und Mitarbeiter (KOPPELMANN 1977, EHRMANN 1982) und BREDEHORST (BREDEHORST 1999) zurück. Verschiedene Erscheinungsreihen müssen wach beobachtet wer-

den; es gilt, die Abwandlung der Erscheinungen durch Variation einiger weniger Bedingungen zu verfolgen.

Erste Versuchsreihe zur Beugung:

Durchblick durch eine Lochblende in die Umgebung

In einen Karton sticht man mit einer Nadel feine Löcher unterschiedlicher Größe. Die Durchmesser der einzelnen Löcher überschreiten dabei 1 mm nicht. Während man ein Auge geschlossen hält, blickt man mit dem anderen durch die eingestochenen Löcher hindurch auf die Umgebung. Insbesondere schaut man Gitter mit regelmäßigen Verstreungen oder – allgemeiner gesprochen – Gegenstände mit periodischen Oberflächenstrukturen an. Von Zeit zu Zeit öffnet man das ansonsten geschlossen gehaltene Auge.

Die Gegenstände der umgebenden Szenerie erscheinen nicht mehr so bunt, es befindet sich gleichsam ein grauer Schleier über ihr. Zusätzlich weist die gesamte Ansicht eine hohe Tiefenschärfe auf: das Auge eines Betrachters muss nicht mehr auf unterschiedliche Entfernungen akkommodieren, vielmehr kann es so entspannt wie sonst nur beim Blick in die Ferne bleiben. Die Verstreungen eines Gitters oder die Periodizität anderer Oberflächenstrukturen können jedoch, sofern sie hinreichend fein sind, jetzt nicht mehr in ihrer Struktur erkannt werden. Sie verschwimmen in einen diffusen, entsprechend farblichen Schleier. Je kleiner der Durchmesser der durchblickten Lochblende ist, umso gröber müssen die angeblickten Strukturen sein, wenn sie nicht zu einer strukturlosen Ansicht werden sollen.

Beim Öffnen des im allgemeinen geschlossen gehaltenen Auges verkleinert sich das Gesichtsfeld nach kurzer Zeit (ca. eine Sekunde), während es sich beim Schließen mit ähnlicher Verzögerung wieder weitet.

Durchblick durch einen Spalt in die Umgebung

In ein Diarähmchen fügt man zwei Kartons passender Größe so ein, dass sie einen senkrechten Spalt variabler Breite ergeben. Diese kann durch Verschieben der Kartons verändert werden. Die mit gängigen Schneidemaschinen herstellbaren Kanten reichen in ihrer Schärfe meist aus, noch bessere Ergebnisse erhält man, wenn man an Stelle der Kartons zwei Rasierklingen verwendet oder auch eine Spaltblende gebraucht, wie sie von Lehrmittelfirmen angeboten wird.

Durch den Spalt hindurch blickt man auf die gleiche Szenerie, wie sie im vorausgegangenen Versuch durch die Lochblende beobachtet wurde. Die zuvor gemachten Beobachtungen bestätigen sich, allerdings weist der gräuliche Schleier, welcher über der Szenerie gesehen wird, eine zu den Spaltkanten parallele Struktur auf. Hinzu kommt, dass nun nur noch solche Oberflächenstrukturen unscharf werden, die parallel zu den Spaltkanten verlaufen. Kanten, die hingegen senkrecht zu den Spaltkanten liegen, behalten ihre Deutlichkeit bzw. Schärfe bei. Durch Drehen des Spaltes in der Ebene, welche die Kartons festlegen, wird diese Beobachtung bestätigt. Nicht zuletzt kann man, wenn man die Spaltbreite zunehmend verengt, verfolgen, wie die entsprechenden Strukturen immer mehr in einer diffusen Flächenhelligkeit verschwimmen.

Durchblick durch einen Spalt auf eine monochromatische Lampe mit spaltförmiger Öffnung

Mit dem in dem vorausgegangenen Versuch verwendeten Spalt blickt man in einer weitgehend abgedunkelten Umgebung auf eine monochromatische Lampe, beispielsweise eine Natriumdampflampe. Die Glasröhre, in der die Gasentladung brennt, ist durch eine Spaltblende von 1 - 2 mm Breite abgedeckt. Zunächst hält man den durchblickten Spalt so, dass dessen Kanten parallel zu den Spaltkanten der Lampenblende liegen; die Lampe befindet sich einige Meter vom Auge des Beobachters entfernt.

Man sieht nun die Öffnung der Lampenblende - senkrecht zu den Kanten des durchblickten Spaltes – in regelmäßiger Vervielfachung. In der Mitte liegt eine sehr helle Lampenöffnung größerer Breite, während sich nach rechts und links, deutlich schwächer und nach außen hin in ihrer Intensität abnehmend, weitere Bilder der Lampenöffnung erstrecken. Je mehr man die Breite des durchblickten Spaltes reduziert, umso weiter liegen die vervielfältigten Lampenansichten auseinander. Dreht man schließlich wie in dem vorausgegangenen Versuch den durchblickten Spalt, so erstrecken sich die vervielfältigten Lampenbilder längs einer Geraden, die senkrecht zu den Kanten des durchblickten Spaltes steht, die Kanten der Lampenbilder verändern hingegen ihre Orientierung nicht.

In der ersten Versuchsreihe zur Beugung beobachtet man (siehe Themenkasten), wie sich das Sehen verändert, wenn man durch eine Lochblende kleinen Durchmessers oder enge Spaltblenden blickt. Es sind dann kleine, periodische Strukturen nicht mehr aufzulösen. Diese Tatsache macht man sich aus der Versuchsreihe heraus klar: Die vervielfachten Lampenbilder auf einer zu den Kanten des durchblickten Spaltes senkrechten Geraden legen nahe, dass auch sonst, wenn man auf zu den Spaltkanten parallele Kontraste blickt, diese Vervielfachung auftritt. Liegen solche Kontraste mit einer gewissen Regelmäßigkeit nebeneinander und ist die Breite des durchblickten Spaltes hinreichend gering, so überlagern sich die verschiedenen Vervielfachungen der einzelnen Kontraste zu einer diffusen Flächenhelligkeit. So mag man auch einsehen, dass bei der Lochblende in alle Richtungen eine Kontrastvervielfachung auftritt und entsprechend kleine Strukturen damit nicht mehr nur in eine Richtung, sondern überhaupt nicht mehr aufzulösen sind.

Bezieht man in die Analyse den Aufbau des Auges mit ein, so wird deutlich, dass die Spalt- bzw. Lochblenden gewissermaßen eine zweite „Pupille“ vor dem Auge bilden, deren Durchmesser bzw. Breite kleiner sind, als der Durchmesser der eigentlichen Pupille je wird. Die eigentliche Pupille wirkt dann wie eine Blende, die festlegt, wie groß das Gesichtsfeld ist. Wenn man von Zeit zu Zeit beim Durchblick durch die Lochblende das zweite Auge öffnet, so adaptiert man umgehend an die veränderten Beleuchtungsverhältnisse, der Pupillendurchmesser nimmt entsprechend ab. Der schwarze Rand des Gesichtsfeldes, der sich bei der entsprechenden Beobachtungshandlung verkleinert, kommt also durch die Pupille zustande, die hier die Funktion einer das Gesichtsfeld begrenzenden Blende hat.

Im Rahmen des Durchblicks durch eine Lochblende könnten viele weitere

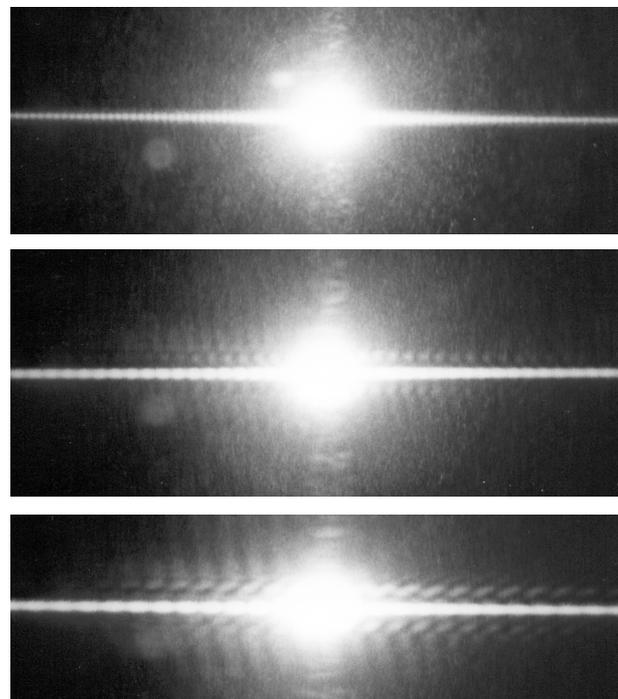


Abb. 11:

Durchblick durch einen Spalt. Von oben nach unten nimmt die Spaltbreite ab.

Aspekte besprochen werden. Im Sinne eines ökonomischen Umgangs mit der Fülle der Unterrichtsinhalte wird jedoch an dieser Stelle der Fokus besonders auf den Zusammenhang zwischen der Kontrastvervielfachung beim Durchblick durch Blenden und dem Unschärfwerden von Ansichten gerichtet. Die Bedingungen deutlichen Sehens werden im Rahmen der ersten Versuchsreihe verändert und das Sehen wird auf dem Hintergrund der dabei gemachten Erfahrungen weiter analysiert. Es bildet den inhaltlichen Rahmen der Untersuchungen.

Mit der zweiten Versuchsreihe zur Beugung schließt sich ein deutlich zielgerichteteres Vorgehen an. An die Stelle der rechteckigen Blendenöffnung vor der Lampe tritt die kleine Glühwendel einer Halogenlampe, welche nur noch als heller Fleck zu sehen ist. Damit wird aber auch die monochromatische Lampe durch eine polychromatische ersetzt. Es treten farbige Ränder auf - im weiteren Gang der Untersuchungen muss demnach verfolgt werden, inwieweit die Kontrastvervielfachung von der Farbe der Beleuchtung abhängt.

Im Übergang vom Spalt zum Gitter metamorphosiert sich die leichte Unregelmäßigkeit, welche sich zuvor noch im Muster der hellen Flecken ergab, zu einem vollständig regelmäßigen Muster (*Abbildungen 11 und 12*). Beim Durchblick durch das Gewebe liegen zwei solcher Gitter senkrecht zueinander, entsprechend orientiert sich das Muster an beiden Richtungen, in welchen die Fäden des Gewebes eine periodische Struktur aufbauen. Ersetzt man die streng regelmäßige Struktur des Gewebes durch die granulare Struktur einer Folie, deren einzelne Körner statistisch verteilt sind, so bildet sich an Stelle eines vollständig regelmäßigen Musters ein Strahlenkranz aus. Dieser wird bei einfarbiger Beleuchtung zu entsprechend farbigen, unregelmäßig angeordneten hellen Flecken.

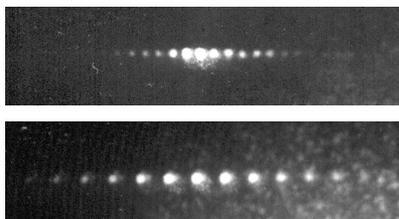


Abb. 12:

Durchblick durch ein Gitter. Von oben nach unten nimmt die Gitterkonstante ab.

An die erste Erscheinungsreihe zur Beugung schließt sich hier eine zweite an. Sie stellt den Ausgangspunkt für eine Fülle von Untersuchungen dar. Zu Gunsten eines möglichst großen Erscheinungsreichtums zu Beginn wird an dieser Stelle auf engmaschige Erklärungen verzichtet. Diese ergeben sich durch den Gang des Unterrichtes, so wie er hier vorgeschlagen wird, Schritt für Schritt. - Die Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsrei-

Zweite Versuchsreihe zur Beugung:

Durchblick durch einen Spalt auf eine Halogenlampe

Durch einen Spalt, dessen Herstellung im Rahmen der ersten Versuchsreihe zur Beugung dargestellt ist, blickt man auf eine Halogenlampe mit kleiner Glühwendel, die einige Meter von einem entfernt aufgestellt wird. Dabei variiert man die Spaltbreite und dreht in der Ebene, welche die entsprechenden Kartons oder Blenden festlegen. Bei festgehaltener Spaltbreite werden im Anschluss vor die Halogenlampe verschiedene Farbfilter gehalten.

Der helle Fleck, als welcher die Halogenlampe mit kleiner Glühwendel gesehen wird, erscheint beim Durchblick durch den Spalt in regelmäßiger Vervielfachung. Alle hellen Flecken liegen auf einer Geraden senkrecht zu den Spaltkanten. Rechts und links erstrecken sie sich neben einem größer und besonders hell gesehenen Flecken in äquidistanter Anordnung. Der helle Fleck im Zentrum hat als einziger einen größeren Abstand zu den benachbarten Flecken und wird rein weiß gesehen, während die anderen Flecken farbige Säume aufweisen: nach außen hin, d.h. auf der vom hellen Fleck im Zentrum abgewandten Seite, sind die Ränder gelb und rot, nach innen hin blau und violett. Je nach Spaltbreite tritt zwischen gelb und blau noch grün auf. Die farbigen Ränder erscheinen nur dort, wo die Kanten, zumindest teilweise, in Richtung der Spaltkanten liegen. Diese Beobachtung bestätigt man insbesondere durch die oben genannten Drehungen des Spaltes. Die Abhängigkeit von der Spaltbreite entspricht schon den in der ersten Versuchsreihe zur Beugung gemachten Beobachtungen: je kleiner die Breite des durchblickten Spaltes wird, umso weiter liegen die hellen Flecken auseinander. Wählt man die Spaltbreite vergleichsweise groß, so lassen sich die hellen Flecken nur noch teilweise erkennen. Auch wird es schwer, eindeutig farbige Ränder bestimmter Flecken auszumachen. Vielmehr erblickt man einen hellen, vorwiegend unbunten Streifen senkrecht zu den Spaltkanten. Auch bei einem engen Spalt verliert sich zu den Rändern hin die eindeutige Struktur heller Flecken, wie auch die farbigen Ränder zurücktreten zu Gunsten eines nur noch teilweise polychromen und ansonsten hellen, unbunten Streifens. Wählt man die Spaltbreite so, dass man einzelne Flecken samt den ihnen zugeordneten farbigen Rändern noch unterscheiden kann, und hält dann verschieden farbige Filter vor die Lampe, dann liegen die Abstände der nun einfarbig gesehenen hellen Flecken unterschiedlich weit auseinander. Ihre Position ist immer genau dort, wo zuvor die farbigen Ränder der entsprechenden Flecken festgestellt wurden.

Durchblick durch ein Gitter auf eine Halogenlampe

Tauscht man den Spalt gegen ein Gitter aus, dessen Gitterstege äquidistant liegen, und wiederholt den oben beschriebenen Versuch, so kann man fast alle dort festgestellten Beobachtungen bestätigen. - In der Anordnung der hellen Flecken tritt nun aber eine Neuigkeit auf: es liegt zwar weiterhin im Zentrum ein heller, weißer Fleck ohne farbige Ränder, sein Abstand zu seinen benachbarten hellen Flecken gleicht jetzt aber dem, den diese zu ihren anderen Nachbarn haben. Damit liegen alle hellen Flecken äquidistant zueinander. Bis auf den Flecken im Zentrum haben sie farbige Ränder. Die hellen Flecken treten deutlicher und schärfer hervor.

Durchblick durch ein feines Gewebe auf eine Halogenlampe

Tauscht man den Spalt durch ein feines Gewebe aus und wiederholt den zuerst oben beschriebenen Versuch, so sieht man senkrecht zu beiden Richtungen der Gewebefäden wieder helle Flecken. Im Zentrum steht ein heller, rein weißer Fleck, er steht in der Mitte eines hell hervortretenden Kreuzes der vervielfachten hellen Flecken. Diese zeigen analog zum Spalt und Gitter farbige Ränder auf. In allen vier Quadranten, welche dieses Kreuz festlegt, liegen weitere helle Flecken mit farbigen Rändern. Sie bilden zusammen mit den hellen Flecken des Kreuzes ebenfalls ein regelmäßiges Gitter. - Bei Variation der oben genannten Bedingungen ergeben sich entsprechende, dort beschriebene Veränderungen der Ansicht.

Durchblick durch eine granulare Folie auf eine Halogenlampe.

Tauscht man das Gewebe durch die granulare Folie handelsüblicher Prospekthüllen aus, deren Körner statistisch verteilt sind, und wiederholt den oben zuerst beschriebenen Versuch, so sieht man nicht mehr die hellen Flecken in regelmäßiger Anordnung, vielmehr erblickt man einen Strahlenkranz. In einigen Bereichen des Strahlenkranzes findet sich die eine oder andere Farbe, tendenziell macht dieser aber einen unbunten Eindruck. Dreht man die granulare Folie, so dreht sich der Strahlenkranz mit, stellt man verschieden farbige Filter vor die Halogenlampe, so wandelt sich der Strahlenkranz zu einem Muster statistisch angeordneter Flecken ab. Auch dieses Muster folgt den Drehungen der Folie.

hen setzt voraus, dass am Beginn einer Unterrichtsreihe eine Fülle von Erscheinungen bzw. Experimenten kennengelernt wird. Nur so kann das eine Experiment auf das andere bezogen werden. Dazu gilt es aber, im Unterricht die Beobachtungen sauber festzuhalten, so dass Gemeinsamkeiten bemerkt werden und als ordnender Gesichtspunkt dienen können.

Durch die Versuchsreihen mag demnach Folgendes festgehalten werden:

- Scharfer Kontrast, wie beispielsweise eine kleine, helle Lampe vor abgedunkeltem Hintergrund, transformiert sich beim Durchblick durch einen engen Spalt in ein Muster regelmäßiger Vervielfachung. Wenig kontrastierte Ansichten hingegen werden parallel zu den Spaltkanten unscharf.
- Ordnet man den Spalt periodisch zu einem Gitter, so tritt das Muster regelmäßig vervielfachter Ansichten ebenfalls vollkommen periodisch und gleichzeitig schärfer und deutlicher auf.
- Durch Veränderung der Lampengeometrie und durch die Drehungen der durchblickten Strukturen bemerkt man, dass die regelmäßig angeordneten hellen Flecken vervielfachte Lampenbilder sind.
- Je mehr man die durchblickte Struktur verkleinert, umso größer ist der Abstand zwischen den Lampenbildern des Musters.
- Es treten an den Kanten, die in Richtung der Spalt- oder Gitterkanten laufen, farbige Ränder auf.
- Die Farbigkeit der Beleuchtung äußert sich in den Abständen zwischen den vervielfältigten Lampenansichten.
- Wird aus der regelmäßig angeordneten durchblickten Struktur die unregelmäßige Körnigkeit einer granularen Struktur, so sind die vervielfachten Lampenansichten ebenfalls statistisch angeordnet (monochromatische Beleuchtung) bzw. bilden sie einen Strahlen-

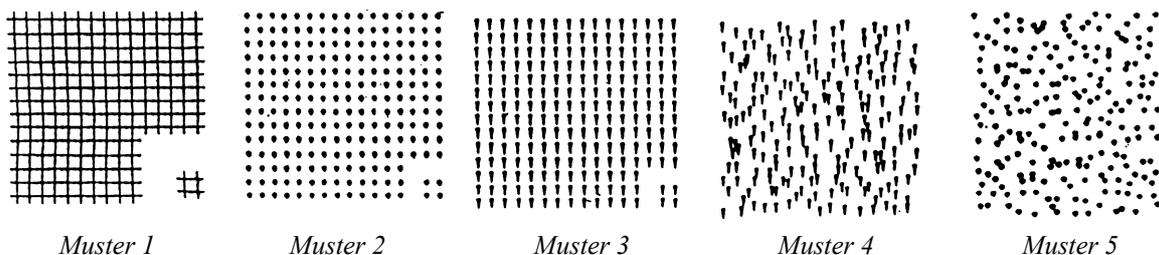


Abb. 13:

Versuchsreihe zur Beugung nach KOPPELMANN (KOPPELMANN 1992).

kranz (polychromatische Beleuchtung).

Die sich in Durchsicht fein strukturierter Zwischenräume ergebenden Bilder werden nun als *Beugungsbilder* bezeichnet, sie werden durch weitere Versuche untersucht und bestimmt. Die Bedingungen ihres Erscheinens sollen auch quantitativ formuliert werden. Dazu wählt man Versuche, bei denen an die Stelle des Auges eine Linse und ein Schirm treten. Der Charakter dieser Versuche wird im folgenden, die Durchführung der entsprechenden Versuche im dann anschließenden Kapitel thematisiert.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch eine weitere Erscheinungsbildreihe besprochen, die auf KOPPELMANN (KOPPELMANN 1992) zurückgeht.

Sie kann sich an die erste und zweite Versuchsreihe zur Beugung anschließen, mag aber auch erst gegen Ende, zum Abschluss des Themas Beugung im Unterricht behandelt werden. Sie zeigt den Zusammenhang von Strahlenkränzen und Beugungsbildern noch deutlicher auf und setzt, will man alle Aspekte ihrer Erscheinungen besprechen, umfangreiche Kenntnisse voraus. An dieser Stelle soll lediglich ausgeführt werden, in welchem Zusammenhang sie zu den beiden Versuchsreihen zur Beugung steht.

Auf einem Schwarz-Weiß-Film befinden sich nebeneinander die *Mustern 1 - 5*, wie sie in *Abbildung 13* wiedergegeben sind. *Abbildung 13* zeigt die Umkehrbilder des Filmes.

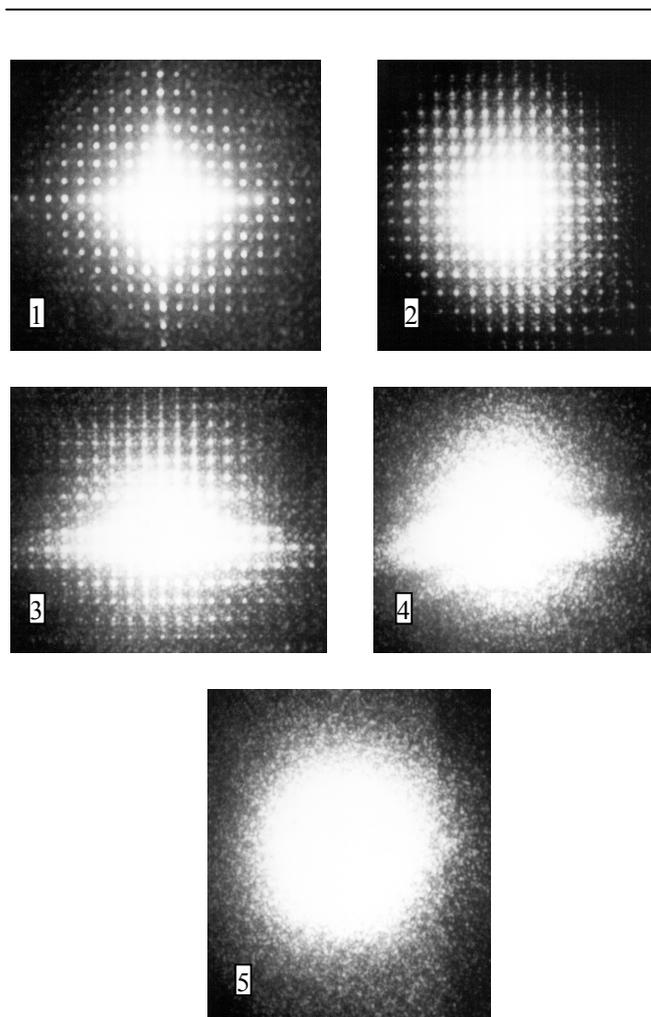


Abb. 14:

Beugungsbilder zu den *Mustern 1 - 5* gemäß *Abb. 13*. Durchgängig gleicher Maßstab.

Dort dunkle Strukturen bilden also einen durchsichtigen Bereich in dem ansonsten geschwärzten Film. Die Netz-, Punkte- und Kommagitter der *Muster 1-3* haben eine Gitterkonstante von $g = 0,12\text{mm}$. Daneben befinden sich zwei Muster, deren Elemente statistisch verteilt sind: bei *Muster 4* handelt es sich um Kommas, bei *Muster 5* um Punkte. Man hält die *Muster 1-5* nacheinander vor das Auge, während man in der Ferne auf eine Halogenlampe mit kleiner Glühwendel blickt und die sich ergebenden Beugungsbilder beobachtet.

Im einzelnen konstatiert man (*Abbildung 14*):

<i>Muster 1:</i>	Das Beugungsbild entspricht dem Beugungsbild beim Durchblick durch ein feines Gewebe, wie es in der zweiten Versuchsreihe zur Beugung bereits ausgeführt wurde. Das Kreuz im Zentrum des Beugungsbildes tritt gegenüber den anderen hellen Punkten deutlich hervor.
<i>Muster 2:</i>	Die Anordnung der hellen Flecken entspricht der des Beugungsbildes von <i>Muster 1</i> . Im Zentrum des Beugungsbildes ist jedoch kein Kreuz mehr zu erkennen, es tritt aber weiterhin ein heller Fleck ohne farbige Ränder dort besonders hell hervor.
<i>Muster 3:</i>	Die Anordnung der hellen Flecken entspricht der des Beugungsbildes von <i>Muster 1</i> . Bei einer Haltung des Musters vor dem Auge in Entsprechung zu <i>Abbildung 10</i> („senkrechte Kommas“), kann man im Beugungsbild die unterschiedlichen Zeilen der hellen Flecken gut unterscheiden, während innerhalb einer Zeile den hellen Flecken eine diffuse, weiße Flächenhelligkeit unterlegt ist. Längs der Spalten der hellen Flecken tritt im Beugungsbild zusätzlich eine Modulation der Helligkeit auf, die sich über jeweils 2 bis 3 Zeilen erstreckt.
<i>Muster 4:</i>	Es tritt eine diffuse weiße Flächenhelligkeit auf, deren Modulation dem unter <i>Muster 3</i> beschriebenen Verlauf entlang der Spalten entspricht. In der Mitte tritt ein Beugungsbild etwas gegenüber der Flächenhelligkeit hervor, das senkrecht auf der Richtung der Kommas steht und vom Verlauf her dem eines Einzelspaltes entspricht.
<i>Muster 5:</i>	Die diffuse weiße Flächenhelligkeit tritt annähernd in der Struktur eines Strahlenkranzes auf. In der Mitte tritt ein heller Fleck besonders hervor.

Im Übergang der Beugungsbilder von *Muster 1* über *Muster 2* zu *Muster 3* bemerkt man, wie neben der Anordnung kontrastierender Elemente auf einem Gitter auch der Kontrast des einzelnen Gitterelementes von Bedeutung ist: Im Beugungsbild des *Musters 1* bilden die Kanten des Netzgitters einen Kontrast, der dem eines senkrecht oder waagrecht gehaltenen Spaltes entspricht. Das zeigt sich in Form des hervortretenden Kreuzes im Beugungsbild. Beim „Punktgitter“ des *Musters 2* fällt hingegen dieser Kontrast weg. Entsprechend tritt das Kreuz nicht mehr hervor. In *Muster 3* dominiert zwar die Längsorientierung der Kommas, ihre unter-

schiedliche Breite entspricht aber einer Zusammenfassung vieler Spalte unterschiedlicher Breite. Dies zieht Vervielfachungen des Kontrastes mit unterschiedlichen Abständen im Beugungsbild nach sich; diese überlagern sich zu einer diffusen, das Muster unterlegenden Flächenhelligkeit. Die Struktur durch die Längsorientierung der Kommas selbst führt außerdem zu der oben beschriebenen Modulation. Diese bleibt im Beugungsbild des *Musters 4*, analog dazu, dass sich im *Muster 4* die Elemente des *Musters 3*, die Kommas, durchziehen. Die hinzutretende statistische Anordnung zeigt sich in einer ansonsten weitgehend homogenen Flächenhelligkeit. Das leicht hervortretende Beugungsbild von der Struktur eines Einzelspaltes dürfte auf den unteren Teil der Kommas zurückgehen, die dort dem Spalt entsprechen. Sobald, wie bei *Muster 5*, die Kontraste keine Richtung mehr auszeichnen und außerdem statistisch angeordnet sind, ergibt sich in alle Richtungen eine diffuse Flächenhelligkeit.

Durch diese Versuchsreihe KOPPELMANNS wird noch deutlicher als durch die zweite Versuchsreihe zur Beugung, wie Strahlenkränze aus Beugungsbildern oder Beugungsbilder aus Strahlenkränzen hervorgehen: In einem Fall ist die durchblickte Struktur fein und regelmäßig geordnet; im anderen erstreckt sie sich in unregelmäßiger Körnigkeit. Im diesem Sinne sind mit den Beugungserscheinungen eine Fülle weiterer Erlebnisse des täglichen Lebens verwandt: ob man nachts auf eine entfernte Lampe blickt, die sich hell blendend gegen ihre dunkle Umgebung abhebt und von einem Strahlenkranz umgeben ist (die hierfür maßgebliche Granulation liegt im Auge selbst) oder ob bei Nebel um Lampen herum ein Hof auftritt. - Mit dem Blick auf Straßenlampen oder Autoscheinwerfer durch einen Gardinenstoff hindurch treten vervielfachte Lampenansichten auf; hier handelt es sich um eine reine Beugungserscheinung.

4.2 Eingebundene und abgelöste Versuche als komplementäre Perspektiven

Die bisher geschilderten Versuche würde man – einer älteren Bezeichnungsweise folgend – als „subjektiv“ bezeichnen: der Beobachter steht im Versuchsaufbau und blickt in Richtung der optischen Achse. In den entsprechenden „objektiven“ Versuchen treten an die Stelle des

Auges eine Optik und ein Schirm; der Beobachter tritt zurück und überblickt den Versuchsaufbau von der Seite, quer zur optischen Achse (GOETHE 1992).

Die letztere, „objektive“ Perspektive ist die historisch etablierte: Beobachtungsergebnisse gelten im allgemeinen erst dann als gesichert bzw. eben „objektiv“, wenn sie sich ablösen lassen vom Bezug auf den Beobachter, vom Kontext im weitesten Sinne. Gerade an Erscheinungen der Optik lässt sich überzeugend zeigen, dass die aus der so genannten subjektiven Perspektive getroffenen Aussagen – zumindest der Möglichkeit nach – nicht minder objektiv sind. Als Beispiel hierfür mag die in Kapitel 3.1.3 angeführte Herleitung der Brechzahl genannt werden, die mit einfachsten Mitteln z.B. in der 8. Klasse von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden kann.

Der Herabsetzung des subjektiven Standpunktes gegenüber dem objektiven soll im Zusammenhang des hier vertretenen Ansatzes aus folgendem Grund entgegengewirkt werden: In der Möglichkeit, gegenüber *einem* physikalischen Sachverhalt sowohl den einen, als auch den anderen Standpunkt einnehmen und *zwischen beiden wechseln zu können*, wird ein didaktisches Mittel gesehen, dem Bedürfnis der Schülerinnen und Schüler nach *Teilnehmen* (subjektiv) und *Betrachten* (objektiv) als zunächst gleich berechtigten, komplementären Formen des menschlichen Weltbezuges zu entsprechen.

Zu diesem Zweck liegt es nahe, die Bezeichnungen „subjektiv“ und „objektiv“ wegen ihrer historisch bedingten Konnotation zu ersetzen. Dem Vorschlag MACKENSENS folgend, wird hier an der Stelle von „subjektiven“ von *eingebundenen* und an der Stelle von „objektiven“ von *abgelösten* Versuchen gesprochen (MACKENSEN, M.V.: private Mitteilung).

Für die Versuchsreihen, wie sie hier dargestellt werden, heißt das: Die Schülerinnen und Schüler schauen nicht *von außen* auf den Versuchsaufbau und konstatieren auf einem Schirm die Änderungen der Beugungsbilder, sondern sie nehmen an der Versuchsdurchführung *tätig teil*. Indem sie selbst die Versuchsbedingungen variieren, also z.B. das durchblickte Gewebe drehen, erleben sie unmittelbar, wie sich das Beugungsmuster in Bezug auf die Lage der vielfältigten Lampenansichten mitdreht, die einzelne Lampenansicht sich in ihrer Form aber nicht verändert. Damit drängen sich aber auch Fragen nach dem Wandel der Erscheinungen um ein Vielfaches stärker auf als solche, die sich aus nur vermittelter Kenntnis der genauen Versuchsbedingungen ergeben. Versuche bzw. Versuchsreihen, in die sich die Experimentato-

ren als unmittelbare Teilnehmer in der dargestellten Art hineinstellen, werden im Folgenden *eingebundene Versuche* genannt.

Dem stehen Versuche gegenüber, bei denen in der Bildebene an die Stelle des Auges eine Linse und ein Schirm treten. Die experimentierende Persönlichkeit schaut *von außen* auf den Versuchsaufbau. Sie überblickt die räumliche Anordnung der Elemente und die Abwandlung von Ansichten mit Distanz. D.h. sie genießt eine Unabhängigkeit, derer sie für die intellektuelle Durchdringung des Versuchs auch bedarf: Ausmessen von Beugungsbildern, geometrisches Analysieren des Versuchsaufbaus – wie der Funktionszusammenhang des Ganzen quantitativ zu fassen und aus der Wirkungsweise der einzelnen optischen Komponenten zu erschließen ist, wird zur Herausforderung für seinen analytischen Blick. Solche Versuche sollen im Folgenden *abgelöste Versuche* genannt werden.

Der Wechsel vom Erleben der Versuche und der sorgfältigen Beobachtung der Erscheinungen bis hin zur gedanklichen Überschau und zum Erarbeiten einheitlicher Begriffe wird also durch den Übergang von eingebundenen zu abgelösten Versuchen vorbereitet. Deshalb werden im weiteren Gang des Kerncurriculums einige Freihandversuche in ihrer abgelösten Form wieder aufgegriffen. Dort stehen dann die Abmessungen des Gitters in ihrem geometrischen Bezug auf die räumliche Gestalt des Beugungsbildes im Vordergrund. – Dieser Perspektivenwechsel für die geometrische Analyse des Versuchs wird bewusst gesetzt. Er macht den Schülerinnen und Schülern im Gang des Unterrichtes selbst deutlich, dass sie einerseits durch den wachen Gebrauch ihrer Sinne sich den Erscheinungen selbst annähern können, bis dahin, dass sich durch die gebotene Fülle weiteres Interesse entzündet, und dass sie sich andererseits durch die Führung ihrer intellektuellen Fähigkeiten wissenschaftlich tragfähige Begriffe und Zusammenhänge erobern. Dieser Wechsel erfrischt den Unterricht; es wird vermieden, die Beugung in einer emotionalen Schicht als etwas anzusehen, was außerhalb von einem nur „mit komplizierter Mathematik bzw. Geometrie“ zu durchschauen ist. Außerdem wird gezeigt, wie zur Untersuchung einer Erscheinung im Versuch zwei komplementäre Elemente gehören können: erlebnisstarke Einbettung und besonnene gedankliche Ordnung.

4.3 Der Übergang vom eingebundenen zum abgelösten Versuch

In diesem Kapitel soll der Übergang von den Freihandversuchen, also von eingebundenen Versuchen, zu den entsprechenden abgelösten Versuchen thematisiert werden. Das schließt eine geometrische Analyse mittels der optischen Wege mit ein. Diese Analyse nimmt auf die Linsenabbildung Bezug; insofern ist in den Gang der Erläuterungen ein Kapitel zur Linse im Konzept optischer Wege integriert.

Wie bereits im Rahmen der Freihandversuche erläutert (Kapitel 4.1), wird mit dem Übergang vom Spalt zum Gitter das Beugungsbild gleichmäßiger und gleichzeitig deutlicher. Der geometrische Bezug zwischen dem durchblickten bzw. durchleuchteten Gitter und den vervielfachten Lampenansichten des Beugungsbildes zeigt sich hier besonders rein. Von daher bietet es sich mit dem Übergang von den eingebundenen zu den abgelösten Versuchen an, zunächst die Beugung am Gitter zu behandeln und von dort aus den Weg zu Erscheinungen zu suchen, die weniger strukturiert auftreten. In einer phänomenologischen Terminologie wird der Weg vom reinen zum abgeleiteten Phänomen gesucht, wobei diese Wertung erst im Überblick über die Erscheinungen deutlich werden kann und dann zu diskutieren ist.

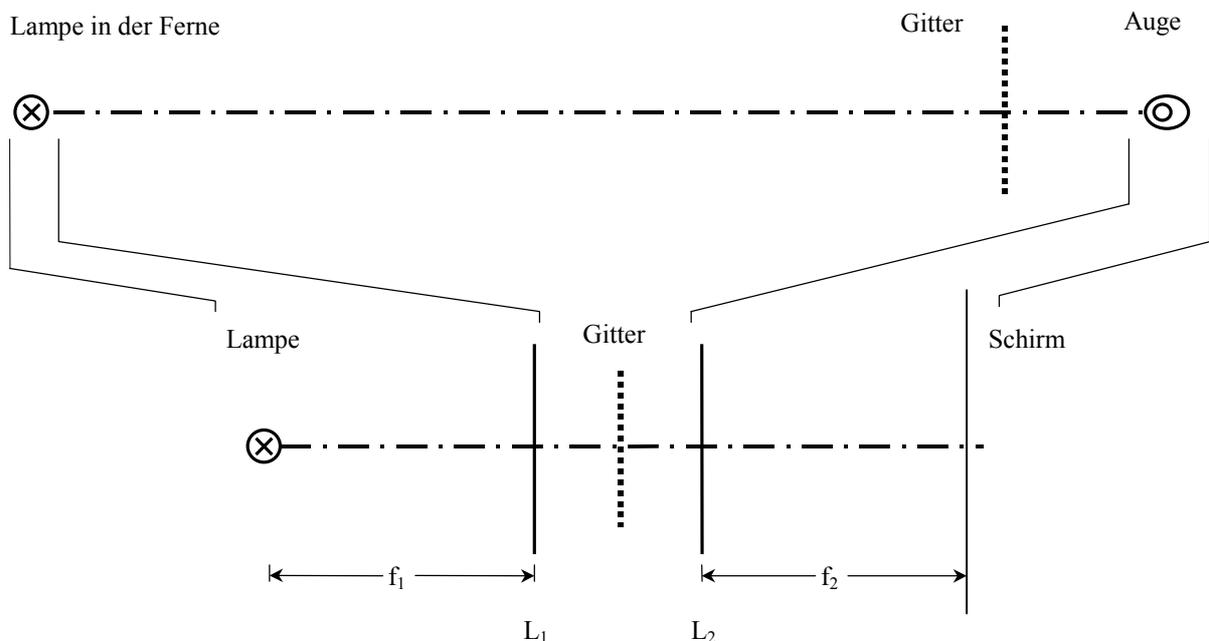


Abb. 15:

Beugung am Gitter: Entsprechung von eingebundenem und abgelöstem Versuch

4.3.1 Die Verbindung von eingebundenen und abgelösten Beugungsversuchen

Den Freihandversuchen, die als eingebundene Versuche am Anfang des Kerncurriculums stehen, ist gemeinsam, dass vor das Auge gehaltene Strukturen durchblickt und Lampen in der Ferne angeblickt werden. Das Auge akkommodiert auf die Lampe in der Ferne, damit fällt die Brennebene der Augenlinse mit der Netzhaut zusammen.

Im abgelösten Versuch tritt an die Stelle des in die Ferne akkommodierenden Auges eine Linse, in deren Brennebene ein Schirm steht (Linse L_2 in *Abbildung 15*). Vor der Linse wird das Gitter justiert. Will man den Versuchsaufbau kompakt halten und gleichzeitig helle Beugungsbilder beobachten, so empfiehlt es sich, nicht eine Lampe in großer Entfernung aufzustellen, mittels derer man dann das Gitter durchleuchtet, sondern vielmehr im Brennpunkt einer weiteren Linse die Lampe zu montieren (Linse L_1 in *Abbildung 15*). Die Mittel- bzw. Hauptpunkte beider Linsen, die Mitte des Gitters und die (kleine!) Glühwendel der Lampe werden dann so fixiert, dass sie die optische Achse bilden. - Die Schattengrenzen, welche bei Beleuchtung mit der Lampe durch die Linsenbegrenzung der Linse L_1 hervorgerufen werden, verlaufen annähernd parallel (siehe folgendes Kapitel) und kennzeichnen damit *eine* Durchleuchtungsrichtung des Gitters. Bei einer in der Ferne stehenden Lampe wird das Gitter ebenfalls nur aus einer Richtung durchleuchtet. In beiden Fällen stehen die Durchleuchtungsrichtungen senkrecht auf der Ebene des Gitters und laufen parallel zur optischen Achse.

Der hier entwickelte Versuchsaufbau setzt voraus, dass man Lampen verwendet, die in einem nicht zu kleinen Raumwinkel ihre Umgebung erhellen. Bei Halogenlampen mit kleiner Glühwendel ist diese Bedingung erfüllt. Kommen hingegen Laser zum Einsatz, so muss der Laserstrahl zuerst durch eine Linse kleiner Brennweite in deren hinterem Brennpunkt gebündelt werden. Dieser Brennpunkt muss dann auf der optischen Achse am Ort der Lampe liegen (siehe *Abbildung 17*).

Eine geometrische Analyse setzt jetzt einige Kenntnisse über die Eigenschaften von Konvexlinsen voraus. Wie dieses Thema im Unterricht noch vor der Beugung im Konzept optischer Wege behandelt werden mag, findet sich als thematischer Einschub im folgenden Kapitel.

4.3.2 Einschub: Die Linse im Konzept optischer Wege

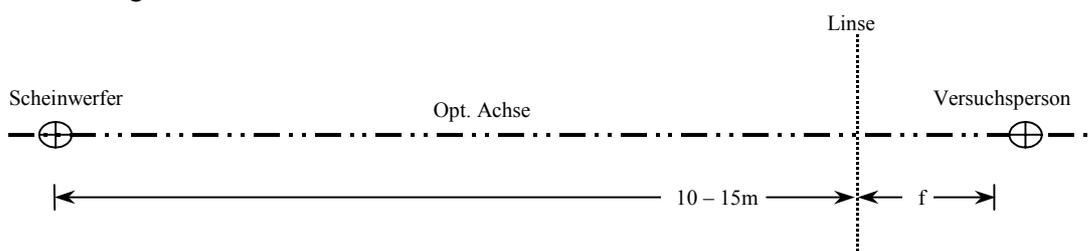
Bereits in Kapitel 3.1.3 wird dargestellt, wie im Rahmen der modellfreien Optik von MACKENSEN die Linse behandelt werden mag: Eine konvexe Linse denkt man sich zunächst aus vielen Prismensegmenten zusammengesetzt, deren Prismenwinkel sich kontinuierlich vergrößert bzw. verkleinert. Je größer der Prismenwinkel, umso größer ist die Verschiebung. Damit werden all die Dinge, welche wir mehr am Rand der Linsenfassung erblicken, weiter verschoben als die Gegenstände, welche man in der Nähe der Linsenmitte sieht. Von der Mitte ausgehend nimmt die Verschiebung zu, man sieht Gegenstände demnach vergrößert.

Der Übergang von der Vergrößerung mittels einer Konvexlinse zur Linsenabbildung erfolgt dann wie nachstehend ausgeführt. Man erhöht, wie in *Versuch 3* beschrieben, den Abstand zwischen Linse und Auge so lange, bis man sich annähernd in der Bildebene befindet. Dabei blickt man unter immer kleineren Winkeln bezüglich der optischen Achse in Richtung Gegenstand. Der Sichtinhalt der Linse stammt aus kleinen engen Bereichen der Gegenstände, welche durch die Linse betrachtet werden, bis schließlich als Grenzfall die Linse ganz von einem Fleck des betrachteten Gegenstandes erfüllt ist. Leicht veränderte Augenpositionen innerhalb dieser Ebene führen zu Linsenablicken, die vollständig von anderen „vergrößerten Flecken“

V 3:

Mit einem Abstand von 10 - 15 m werden einige helle Scheinwerfer vor einer Linse aufgebaut, deren Brennweite f zwischen 30 und 60 cm liegt. Eine Versuchsperson blickt einäugig durch die Linse auf die Scheinwerfer und vergrößert dabei ihren Abstand von der Linse. Während sie mit ihrem Auge von unmittelbar hinter der Linse bis in die Nähe der Brennebene wandert, behält sie fortlaufend einen Scheinwerfer im Blick und berichtet von ihren Beobachtungen.

Je näher ihr Blickpunkt an der Brennebene liegt, umso größer sieht sie den Scheinwerfer innerhalb der Linsenfassung. Schließlich erfüllt der Scheinwerfer die ganze Linse. Gleichzeitig erscheint auf der Haut rund um das Auge ein umgekehrtes Bild der Scheinwerferkonstellation samt ihrer nahen Umgebung. Hält man an die Stelle des Auges senkrecht ein Transparentpapier, so beobachtet man ungestört das Bild, welches bereits um die Augenpartie unserer Versuchsperson zu erkennen war. Vergrößert die Versuchsperson ihren Abstand zur Linse noch weiter, so sieht sie schließlich an der Stelle des Transparentpapiers das Bild auch dann, wenn man das Transparentpapier entfernt. Dabei spürt sie deutlich, wie sie auf die geringe Entfernung zum Bild ihr Auge akkomodieren muss.



erfüllt sind, nämlich Flecken, die bei dem betrachteten Gegenstand dicht neben dem ursprünglichen liegen.

Ein Schirm an der Stelle des Auges wird an jedem Ort genau so hell sein, wie man von ihm aus Hellen sieht. Die Helligkeit einzelner Orte auf ihm richtet sich insbesondere nach der Helligkeit innerhalb der Linsenöffnung, welche man von ihnen aus sieht. Diese Helligkeit geht ihrerseits wiederum auf den entsprechend angeblickten Fleck auf dem Gegenstand zurück: Es wird hier demnach erläutert, wie das Bild in der Bildebene aus der Gesamtheit der dargestellten Sichtbeziehungen entsteht. Wandert man mit dem Auge nach unten, sieht man einen weiter oben liegenden Fleck, der „in der Linse schwimmt“, sie als Ganzes ausfüllt, wandert man nach links, liegt der entsprechende Fleck weiter rechts. Das Bild ist umgedreht und seitenverkehrt.

Im Rahmen der bis hier beschriebenen Sachverhalte kann also festgehalten werden, dass zwischen den einzelnen Flecken des Gegenstandes in der Gegenstandsebene und den einzelnen Augenpositionen in der Bildebene eine eindeutige Beziehung auftritt, welche die Linse vermittelt. In geometrisierender, idealisierter Form mag man von einer Punkt-zu-Punkt-Beziehung sprechen: jedem Gegenstandspunkt wird eindeutig ein Bildpunkt zugeordnet und umgekehrt.

Mit der Integration der optischen Wege in die modellfreie Optik von MACKENSEN (Kapitel 3.3.3) treten weitere Gesichtspunkte hinzu. Wie *Versuch 4* zeigt, ändert sich, wenn man durch eine schwarze Pappe vor der Linse, aber auch durch eine entsprechend aufgestellte Ringblende

V 4:

Von der Rückseite des Raumes bildet man den Glühfaden einer Lampe mit einer Linse auf eine Leinwand an der Vorderseite des Raumes ab. Sofern man eine helle Lampe mit markanter Glühfadengeometrie besitzt, eignet sich diese besonders. Aber auch mit der Glühwendel gängiger Halogenlampen (12V, 60W) ist der Versuch gut durchführbar. Man justiert die Linse so, dass das Bild des Glühfadens vergrößert auf der Leinwand zu sehen ist.

Anschließend stellt man einen eingespannten schwarzen Karton mit etwas Abstand vor die Linse und sticht mit einer Schere fortlaufend Löcher in den Karton: das Bild des Glühfadens erscheint nach dem ersten Loch und wird mit jedem gestochenen Loch heller. Eine sich vor die Leinwand stellende Versuchsperson erblickt von einem Ort des Glühfadenbildes aus immer mehr Bereiche der Linse, welche sich in recht gleichmäßiger Erhellung dem Blick darbieten. Auch durch verschiedene andere partielle Abdeckungen der Linsenöffnung (Karton vor Linse, Ringblende) lassen sich die Beobachtungen bestätigen.

Zum Ende verwendet man nochmals den Karton mit den eingestochenen Löchern und entfernt zügig die Linse. Im abgedunkelten Raum sieht man an Stelle eines hellen und scharfen Bildes des Glühfadens viele Glühfadenbilder, deren Schärfe in Abhängigkeit von der eingestochenen Lochgröße variiert.

de, Teile der Linsenöffnung ausblendet, nur die Helligkeit des Bildes, mehr nicht. Insbesondere kann man auch dann noch ein, wenn auch abgedunkeltes, Bild sehen, sofern die direkte, durchgehend geradlinige Verbindung zum Gegenstand abgedeckt ist. Der optischen Achse kommt nur eine geometrische Bedeutung zu, sie muss aber nicht als ein durchsichtiges Element im Zentrum der Beleuchtungssituation auftreten. Wesentlich ist nur, wie viel innerhalb der Linsenfassung von der Bildebene aus gesehen werden kann; dabei geht der Sichtinhalt innerhalb der Linsenfassung auf den entsprechenden Gegenstandspunkt zurück.

Diesen Zusammenhang mag man unter einem geometrischen Aspekt durch optische Wege beschreiben. Die Kanten der als Blende wirkenden Pappe definieren Schattengrenzen bzw. Blickrichtungen. Ihren Verlauf geben die optischen Wege an. Weitere Kanten verdeckende Gegenstände, die mit ihnen in einer Flucht zu sehen sind, liegen ebenfalls auf diesen optischen Wegen. Da die Helligkeit der Linse auf einen Fleck des Gegenstandes zurückgeht, laufen die optischen Wege außerdem durch den entsprechenden Fleck des Gegenstandes. Trägt man die Gesamtheit der hier möglichen Blickrichtungen oder Schattengrenzen zusammen, so findet man ein Feld optischer Wege, welches die Beleuchtungssituation charakterisiert. Dieses erstreckt sich vom Bildpunkt bis hin zu jedem Punkt einer Seite der Linsenöffnung wie es auch von jedem Punkt der anderen Seite der Linsenöffnung bis hin zum Gegenstandspunkt zusammenläuft. In der Linse selbst ändern die optischen Wege gemäß dem Brechungs- bzw. Hebungsgesetz ihre Richtung. Ein einzelner optischer Weg setzt sich demnach aus drei geraden Strecken zusammen, die in verschiedene Richtungen weisen: einer Strecke zwischen Gegenstandspunkt und Linse, einer innerhalb der Linse und einer zwischen Linse und Bildpunkt.

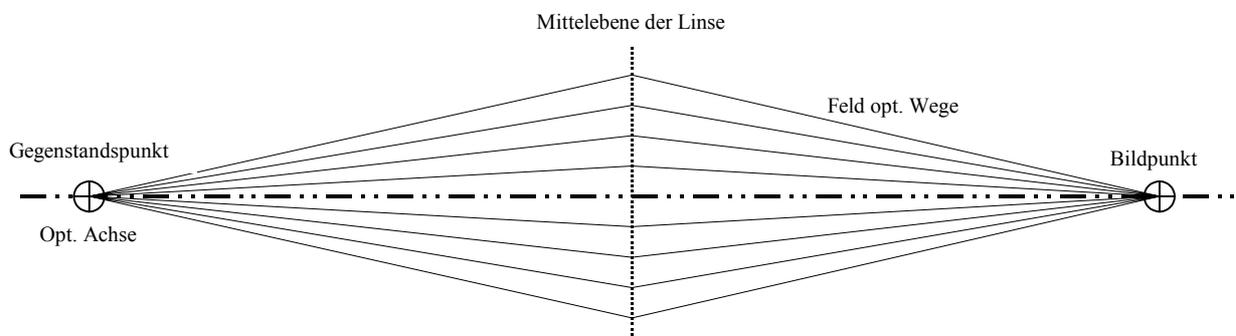


Abb. 16:

Das Feld optischer Wege zwischen Gegenstands- und Bildpunkt. Die Wegabschnitte innerhalb der Linse sind nicht dargestellt.

Der Einfachheit halber werden – wie beispielsweise in *Abbildung 16* – in Zukunft die Strecke innerhalb der Linse nicht dargestellt, sondern nur die Strecken vor und hinter der Linse. Die Linsenposition selbst wird verkürzt durch die Lage ihrer Mittel- oder Hauptebene wiedergegeben.

Das Feld optischer Wege beschreibt einen geometrischen Aspekt der Sicht- oder Beleuchtungsbeziehung, welche die Linse zwischen einem Gegenstands- und einem Bildpunkt vermittelt. In Verbindung mit dem FERMAT-Prinzip (Kapitel 3.3.4) wird den einzelnen optischen Wegabschnitten durch die Multiplikation mit der Brechzahl n eine optische Weglänge zugeordnet. Der Abschnitt eines Weges, welcher innerhalb der Linse liegt, muss hier also mit der Brechzahl n gewichtet werden, während die Abschnitte außerhalb der Linse keine Gewichtung bzw. eine „Gewichtung“ mit einem Faktor von eins erfahren.

Bei der Ermittlung der so definierten optischen Weglänge muss eine detailliertere Rechnung sowohl die Linsenkrümmung als auch die dadurch auftretenden Richtungsänderungen einzelner Wegabschnitte innerhalb eines optischen Weges zwischen Gegenstands- und Bildpunkt berücksichtigen. Diese Rechnung führt bei einer guten Linsenabbildung mittels einer sphärischen Linse zu dem Ergebnis, dass alle optischen Wege des genannten Feldes fast die gleiche Länge haben (Kapitel 3.2.2). Die Weglängen benachbarter optischer Wege unterscheiden sich also fast nicht. Bei einer Sicht- oder Beleuchtungsbeziehung, die eine „ideale Linse“ in Form einer kartesischen Fläche bei einer monochromatischen Beleuchtung vermittelt, entsprechen sich innerhalb dieser geometrischen Untersuchung die Längen aller optischen Wege zwischen Gegenstands- und Bildpunkt. Umgekehrt lässt sich das Kriterium für eine deutliche Linsenabbildung auch über die Forderung gleich langer optischer Wege formulieren.

Sofern man Linsen in Beugungsexperimenten einsetzt, kommt den genannten Tatsachen eine besondere Bedeutung zu: Durch den Einsatz von Linsen ändert sich im Rahmen von Abbildungen die Länge optischer Wege zwischen dem jeweiligen Gegenstands- und Bildpunkt nicht, alle Kriterien, die auf den Unterschied in den Längen optischer Wege zurück gehen, bleiben unberührt.

Im Einzelnen gilt:

- Alle Gegenstandspunkte, die sich auf einer senkrecht zur optischen Achse liegenden Gegenstandsebene befinden, haben Bildpunkte, die in einer Ebene liegen. Diese Bildebene

steht ebenfalls senkrecht zur optischen Achse.

- Zu Gegenständen, die weit weg am Horizont liegen, gehört die Bildebene mit der geringsten Entfernung zur Linse. Die zugehörigen optischen Wege zwischen Horizont und Linse verlaufen (annähernd) parallel. Sie führen zu bestimmten Punkten in der Brennebene. Liegt ihre Richtung parallel zur optischen Achse, spricht man vom Brennpunkt. Das scharfe Bild in der Brennebene geht auf unterschiedliche Helligkeiten des Horizonts zurück, den man vom jeweiligen Ort der Brennebene durch die Linsenmitte peilend in verschiedenen Richtungen erblickt. An Stelle des „Gegenstandspunktes“ tritt hier die Helligkeit in weiter Ferne. Sie lässt sich nur noch durch *eine* Richtung angeben, welche vom Bildpunkt und der Linsenmitte festgelegt wird. Insofern ist das Bild in der Brennebene ein „Richtungsgebilde“, dessen Helligkeit an *einem* Punkt des Bildes auf *eine* Beleuchtungsrichtung zurückgeht. Die Punkt-zu-Punkt-Beziehung wird zu einer Punkt-Richtungs-Beziehung. Hier gilt: Bezüglich einer zu den parallelen optischen Wegen vor der Linse senkrechten Ebene und dem entsprechenden Bildpunkt in der Brennebene sind alle optischen Wege gleich lang.
- Die Linse bestimmt die Richtungsänderungen einzelner Wegabschnitte innerhalb eines optischen Weges. Gehören verschiedenen Feldern gleich langer optischer Wege dieselben Wegabschnitte an, so treten entlang der Wegabschnitte am Ort der Linse dieselben Richtungsänderungen auf. Damit können bestimmte ausgezeichnete Wege für eine Konstruktion der Abbildungsverhältnisse verwendet werden, z.B. die Wege, welche durch den Brennpunkt oder durch den Mittelpunkt der Linse gehen. Sowohl Vorschriften für die Schnellkonstruktion als auch die Linsengleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ (f : Brennweite, g : Gegenstandsweite, b : Bildweite) liegen auf der Hand. Da das Konzept optischer Wege formal mit dem Strahlenmodell identisch ist, sei für ausführlichere Darstellungen auf die Literatur verwiesen (PITKA 1999, S. 228).

Insbesondere gilt es, für die Beugungsexperimente zwei wichtige Ergebnisse festzuhalten: bei scharfen Linsenabbildungen unterscheiden sich die Längen der durch Gegenstands- und Bildpunkte zugeordneten optischen Wege nicht; scharf begrenzte Bilder, welche in der Brennebene auftauchen, weisen darauf hin, dass auf der anderen Seite der Linse die entsprechenden optischen Wege parallel verlaufen. Deutliche Muster in der Brennebene zeichnen dann bestimmte Richtungen auf der Gegenstandsseite des Versuchsaufbaus aus.

Wie bereits zu Beginn der Darstellung des Kerncurriculums erläutert, setzt die hier dargestellte Behandlung der Beugung einen gewissen souveränen Umgang mit der Linse voraus. Im Sinne eines ökonomischen Umgangs mit der Unterrichtszeit reicht es aber, mittels der *Versuche 3* und *4* die Linsenabbildung zu besprechen. Das Ergebnis, welches eine Rechnung über die Länge der optischen Wege liefert, mag dann nur noch mitgeteilt und an dem Verlauf einiger Wege plausibel gemacht werden. Die besonderen Eigenschaften der Brennebene sind, wenn die Linsenabbildung verstanden ist, über die Abbildung des Horizontes auf einen Schirm schnell zu vermitteln.

Abgesehen davon, dass die Linse tief in der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler verwurzelt ist und sich von daher schon eine nicht zu knappe Thematisierung anbietet, ermöglicht die sorgfältige Besprechung der Linse außerdem ein sehr präzises Verständnis der Beugung. Dies wird im folgenden Kapitel darzustellen sein. -

Um es abschließend nochmals hervorzuheben: In diesem Kapitel wurde die Linse nach den Freihandversuchen zur Beugung nicht behandelt, weil sie im Unterricht dort sinnvoll zu besprechen wäre, sondern vielmehr, um gerade die inhaltliche Verknüpfung von Kontrastvervielfachung und Linseneigenschaften bei typischen Versuchen zur Beugung aufzeigen zu können.

4.3.3 Analyse der optischen Weglängen

Die Analyse der optischen Weglängen im abgelösten Versuch kann entweder von einem Aufbau ausgehen, wie er in *Abbildung 15* dargestellt ist, oder es tritt an die Stelle der Lampe ein Laser, dessen Strahl mit einer Linse kurzer Brennweite aufgeweitet wird. In diesem Kapitel soll der zuletzt genannte Aufbau thematisiert werden, um eine weitere Möglichkeit zu dem bereits in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Aufbau zu besprechen.

Ein Gitter, dessen Stege senkrecht stehen, wird von einem Laser möglichst gut ausgeleuchtet. Eine Linse L_1 kurzer Brennweite und eine weitere Linse L_2 deutlich größerer Brennweite weiten den Laserstrahl auf. Der Abstand der beiden Linsen ist gleich der Summe ihrer Brennweiten f_1 und f_2 . So fokussiert die Linse L_1 den Laserstrahl, während die Linse L_2 die Strahlengrenzen wieder parallel zur optischen Achse ausrichtet. Es folgen ein Gitter oder ein Spalt, eine Linse L_3 großer Brennweite und ein Schirm, der in der Brennebene der letzten Linse L_3

steht. Die Abstände zwischen dem Gitter und den beiden benachbarten Linsen L_2 und L_3 können frei gewählt werden, da, wie im Einzelnen noch zu zeigen sein wird, die Richtungen einzelner Beugungsordnungen durch das Gitter festgelegt sind. Die Linse L_3 fokussiert optische Wege einer Richtung entsprechend auf einen Punkt der Brennebene, unabhängig vom Abstand zwischen L_2 und L_3 .

Will man den Zusammenhang zwischen den Abmessungen des Spaltes oder Gitters und der Form des Beugungsbildes kennen lernen, so muss man durchsichtige Bereiche des Gitters auf die Lampenbilder bzw. Ordnungen des Beugungsbildes geometrisch beziehen. Dies stellt sich im Konzept optischer Wege wie folgt dar.

Im eingebundenen Versuch liegt zwischen Lampe und Gitter ein großer Abstand. Diesem entspricht ein Feld annähernd paralleler optischer Wege, die zwischen Gegenstand und Gitter verlaufen. Ein analoges Feld annähernd paralleler optischer Wege erreicht man im abgelösten Versuch durch die Aufweitung des Laserstrahls mit den Linsen L_1 und L_2 . Bis zum Gitter sind die (mit der Brechzahl n gewichteten) optischen Wege alle gleich lang, vor dem Gitter liegen sie außerdem parallel zur optischen Achse. – Den Einfluss von Hornhaut und Augenlinse fasst die Linse L_3 zusammen; an die Stelle der Netzhaut tritt der Schirm. Dem Durchblick durch

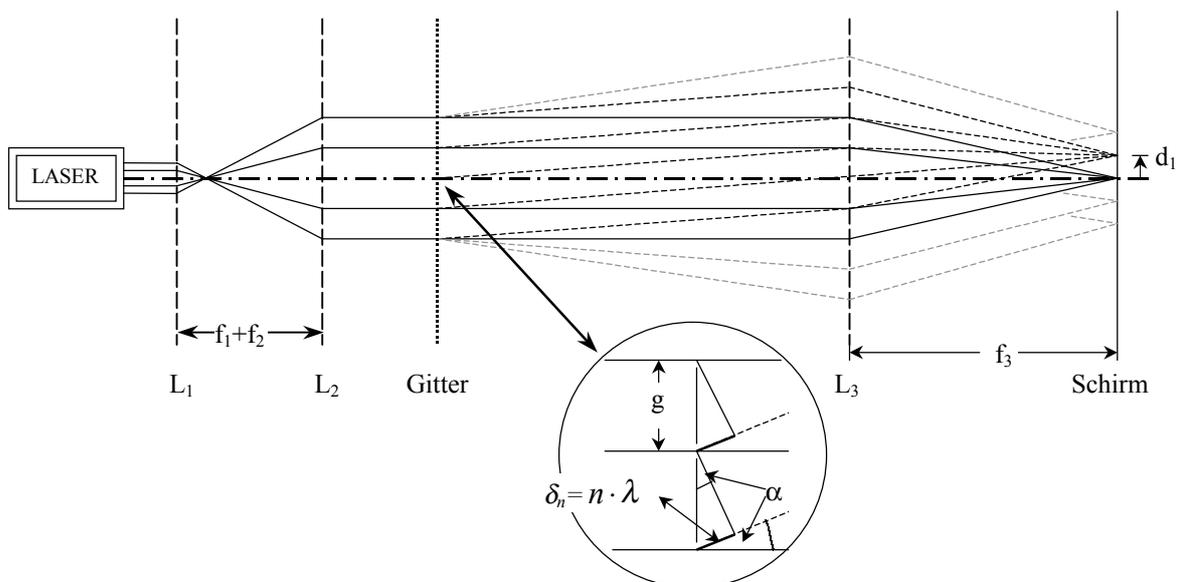


Abb. 17:

Für Lampenbilder n -ter Ordnung unterscheiden sich die optischen Wege benachbarter Gitteröffnungen um $\delta_n = n \cdot \lambda$

das Gitter bzw. der Akkommodation in die Ferne entspricht die Schirmstellung in der Brennebene der Linse L_3 .

Um die Situation zu Beginn einfach zu gestalten, wählt man ein Gitter mit sehr vielen senkrechten Strichen und kleiner Gitterkonstante aus. Die Gitteröffnungen sind im Vergleich zu den Gitterstegen schmal. Man sieht so im Beugungsbild kleine und sehr scharfe, auf einer horizontalen symmetrisch angeordnete helle Flecken: die Lampenbilder 1., 2., allgemein n -ter Ordnung. Diese liegen in einem nicht zu großen Bereich um die Symmetrieachse annähernd äquidistant und treten mit großer Schärfe bzw. hohem Kontrast hervor. Hier macht sich der Einsatz des Lasers geltend.

Da der Schirm in der Brennebene der Linse L_3 steht, gehören zu jedem hellen Fleck des Beugungsbildes zwischen Gitter und Linse L_3 entsprechende, parallele optische Wege, die dann hinter der Linse zusammenlaufen. Sie sind, gemessen von einer zu ihnen senkrechten Ebene diesseits der Linse L_3 bis hin zum Schirm jenseits der Linse L_3 , gleich lang. Außerdem sind zwischen Laser und Gitter trotz der den Laser aufweitenden Linsen, wie oben erläutert, alle optischen Wege gleich lang. Am Gitter knicken, mit Ausnahme der nullten Ordnung, die optischen Wege ab. Gleichzeitig unterscheiden sich dort die zu benachbarten Gitteröffnungen gehörigen optischen Wege jeweils um ein bestimmtes Wegstück gleicher Länge. Diese Wegstücke kann man für alle Beugungsordnungen aus dem Experiment berechnen. Sie sind ganzzahlige Vielfache einer für die Beleuchtung charakteristischen Länge, der Basislänge λ . Dabei geht man von den üblichen Formeln aus:

$$\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{g} \quad \text{und} \quad \tan \alpha_n = \frac{d_n}{f_3}$$

Das Kriterium, welchem die optischen Wege genügen, wenn die Lampenbilder im Beugungsbild auftreten, lautet damit: Für ein Lampenbild n -ter Ordnung unterscheiden sich zu benachbarten Gitteröffnungen gehörige optische Wege um die Länge $\delta_n = n \cdot \lambda$. Hingegen sind alle zu einer bestimmten, einzelnen Gitteröffnung und Beugungsordnung gehörenden optischen Wege gleich lang. Das Beugungsbild hat nur in der Richtung vervielfachte Lampenansichten, in der sich zu benachbarten Gitteröffnungen gehörige optische Wege um ganzzahlige Vielfache der Basislänge unterscheiden. In der Richtung, in welcher alle optischen Wege gleich lang sind, tritt keine Beugung auf.

Die Schüler erschließen sich also aus der Erscheinung des Beugungsbildes im Experiment ein Kriterium für optische Wege. Dabei gehen sie zunächst von einer monochromatischen Beleuchtung aus. Sie erweitern den Begriff des optischen Weges, mit dem sie stets räumliche Zusammenhänge in optischen Experimenten formuliert haben, auf die Beugung. Dabei treten ganzzahlige Vielfache einer Basislänge auf, die sie mit λ bezeichnen und die je nach Farbe der Lampe unterschiedlich groß ist. Ein spontaner Schülerausruf während einer entsprechenden Stunde im Laufe der Erprobung des Curriculums fasste das Ergebnis so zusammen: „Die optischen Wege sind hier ja wie die Ladung beim MILLIKAN-Versuch quantisiert“. Der Schüler hatte die Basislänge λ kennen gelernt, ohne die Modellvorstellung einer Welle zugrunde gelegt zu haben.

Damit lassen sich die beiden geometrische Bedingungen, welche für die optischen Wege eines Lampenbildes n -ter Ordnung im Beugungsbild gelten, in Form zweier Bedingungen zusammenfassen:

- **1. Bedingung:** Für benachbarte Gitteröffnungen unterscheiden sich die Längen optischer Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$.
- **2. Bedingung:** Die optischen Wege *einer* Gitteröffnung sind alle gleich lang.

Diese beiden Bedingungen erweitern das FERMAT-Prinzip auf den Fall, dass durch scharfe, periodische Kontraste vervielfältigte Lampenbilder erscheinen. Dabei muss an dieser Stelle noch nicht auf den Zeigerformalismus übergegangen werden. Vielmehr können weitere Unterrichtsinhalte im Anschluss die Erklärungsmächtigkeit dieser beiden Bedingungen aufzeigen (Kapitel 5.1).

Für den Fall, dass an Stelle des aufgeweiteten Laserstrahles eine Halogenlampe kleiner Glühwendel zum Einsatz kommt, werden die hellen Flecken auf dem Schirm zu Bildern der Glühwendel. Zusätzlich treten jetzt farbige Ränder auf, die sich bei einer hinreichend kleinen Glühwendel und Gitterkonstanten auch überlagern können. Durch den Einsatz von Filtern kann geprüft werden, wie für die einzelne Farbe die Beugungsmuster liegen.

Die vervielfachten Glühwendelbilder sind, wenn die Linsen L_1 und L_2 gemäß *Abbildung 15* gleiche Brennweite haben, gleich groß wie die Glühwendel selbst (Kapitel 4.3.1). Ein einzel-

ner Fleck auf der Glühwendel ist, befindet sich diese doch in der vorderen Brennebene der Linse L_1 , für die Ausleuchtung des gesamten Gitters verantwortlich. Die zugehörigen optischen Wege verlaufen zwischen der Linse L_1 und dem Gitter alle parallel, die zu verschiedenen Flecken der Glühwendel gehörigen Scharen paralleler optischer Wege stehen aber in leicht unterschiedliche Richtungen zueinander. Nur so kann es zu einer Abbildung der Lampenform kommen. Offensichtlich gelten - sobald Beugungserscheinungen auftreten - die beiden oben genannten Bedingungen an die optischen Wege für alle diese Scharen paralleler optischer Wege, mittels derer man die Lampenabbildungen darstellen kann.

Da der Versuch weder mit einem einfachen Spalt noch mit einem Doppelspalt, sondern vielmehr mit einem Gitter kleiner Gitterkonstanten und großer Strichzahl durchgeführt wird, treten scharf kontrastierte Lampenbilder auf. Intensitätsübergänge verlaufen so steil, dass keine weichen Kontraste erscheinen. Damit wird man so lange das Beugungsbild in seiner Struktur erkennen können, solange die vervielfachten Lampenansichten ausreichend weit auseinander liegen, die Gitterkonstante also hinreichend klein ist. Dann überlagern sich die vervielfachten Lampenansichten noch nicht zu einer diffusen Helligkeit. Dies ist, qualitativ erläutert, die hier notwendige Kohärenzbedingung. Dabei ist diese Bezeichnung Kohärenzbedingung dem Sprachgebrauch eines gängigen Schulbuches entlehnt (DORN 2000, S. 204).

Die räumliche und zeitliche Kohärenzbedingung (Hecht 2001, S. 570) wird dadurch erfüllt, dass alle optischen Wege von einem Fleck der Lampe bis zum Gitter gleich lang sind und für die einzelnen Beugungsordnungen die Wegdifferenzen $\delta_n = n \cdot \lambda$ nicht übersteigen. Dies sei hier aber lediglich für den interessierten Leser angefügt, der die Entsprechungen von optischen Wegen und dem Wellenmodell des Lichtes überblickt und entsprechend nach den Kohärenzbedingungen fragt. Im Unterricht wird es wohl ausreichen, qualitativ die Kohärenzbedingung in Entsprechung zu DORN (2000, S. 204) zu thematisieren.

In Vorbereitung eines Unterrichtes zur Quantentheorie ist es vielmehr hier wichtig hervorzuheben, dass zwischen einem Fleck der Lampe und dem Gitter alle optischen Wege gleich lang sind und alle in gleicher Richtung das Gitter durchleuchten. Die *Gesamtheit* des Gitters ist durchgängig auf *einheitliche Art* mit den Leuchtprozessen zu korrelieren, die an diesem Ort der Lampe stattfinden. Dies trifft auch auf die Ausleuchtung des Gitters mit einem Laser zu.

Der hier vorgeschlagene Weg, das Beugungsexperiment im Konzept optischer Wege zu ana-

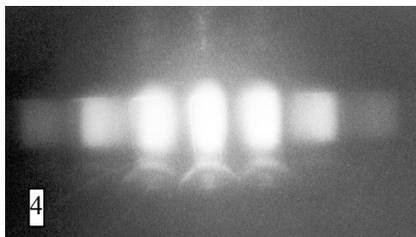
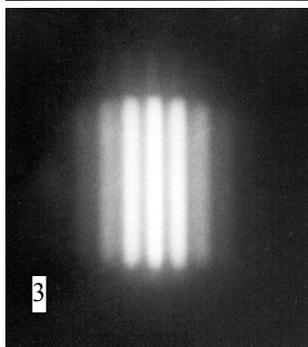
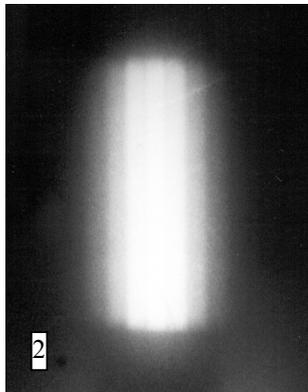
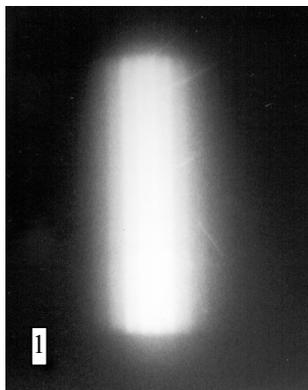


Abb. 18:

Ansichten auf einem Schirm zwischen Gitter und Linse (1,2) bzw. Linse und Brennebene (3,4). Vor dem Gitter befindet sich ein Spalt mit einer Breite von ca. 3 mm.

lysierten, kann methodisch noch dadurch besonders motiviert werden, dass man in dem Versuch gemäß *Abbildung 15* vor das Gitter einen Spalt stellt, der mit einer Breite von einigen Millimetern voll geöffnet ist (Kapitel 4.3.1). Nun bringt man an verschiedene Stellen zwischen dem Gitter und dem Schirm ein Transparentpapier und verfolgt die entsprechenden Veränderungen der Ansichten. Bei hinreichend kleiner Gitterkonstante des Gitters sieht man, wie sofort hinter dem Gitter aus dem hellen, rechteckigen Bereich, welchen der Spalt definiert, mehrere rechteckige Bereiche werden, die mit zunehmendem Abstand vom Gitter in Richtung Schirm bzw. Linse immer weiter auseinanderlaufen. Verringert man die Spaltbreite in ausreichendem Maße, so trennen sich diese hellen rechteckigen Bereiche schon bald hinter dem Gitter vollständig und werden schließlich am Schirm die vervielfachten Lampenansichten einzelner Beugungsordnungen (*Abbildung 18*). Der Verlauf entsprechender optischer Wege lässt sich also nicht nur aus dem Beugungsbild erschließen und als geometrisches Ordnungselement einsetzen, vielmehr erweist sich die operationale Definition des optischen Weges über die Schattenlinie auch weiterhin als voll gültig und tragfähig. Die Kontrastvervielfachung im Kontext der Beugung wird unmittelbar deutlich.

Auf dem Hintergrund dieses Versuches lässt sich zusätzlich die Invarianz des Beugungsbildes unter Translationen besonders einfach behandeln: Verschiebt man das Gitter längs der optischen Achse vor der Linse, so ändert man nur den Ort, an dem die Kontrastvervielfachung beginnt. Diese verläuft aber immer in die gleiche Richtung. Da für die

Helligkeit eines Punktes auf dem Schirm in der Brennebene der Linse nur wesentlich ist, aus welcher Richtung die Durchleuchtung erfolgt, nicht aber der Ort, an welchem die Linse innerhalb ihrer Öffnung durchleuchtet wird, dürfen sich die entsprechenden vervielfältigten Lampenbilder des Beugungsbildes nicht verschieben. Für Translationen, welche senkrecht auf der hier erläuterten stehen, gilt Entsprechendes. - Anwendungsaufgaben, welche diese Invarianz ausnutzen, wie beispielsweise Pendelbewegungen des Gitters vor der Linse, können so als anspruchsvolle Aufgaben im Leistungskurs gestellt werden.

In diesem ersten Teil des Kerncurriculums wird von der Erscheinung der Kontrastvervielfachung ausgegangen und der Bezug zwischen den räumlichen Bedingungen des Erscheinens und der Erscheinung des entsprechenden Beugungsbildes gesucht. Die Erscheinung ist abhängig von der Beleuchtungsfarbe bzw. führt bei thermischen Lampen zu farbigen Rändern, die in Übereinstimmung mit den entsprechenden Beleuchtungsfarben stehen. Die auftretenden Wegdifferenzen der optischen Wege variieren entsprechend der Beleuchtungsfarbe. - Da im Gang des Unterrichtes bis zu diesem Punkt noch kein Lichtmodell notwendig ist, bietet sich der Ausdruck Basislänge an, wie er auch von ERB und SCHÖN verwendet wird (ERB 1994). Im Gegensatz zu ERB wird aber nicht über die auftretenden Interferenzen auf die Additionen von Lichtintensitäten zurückgeschlossen und daran der Zeigerformalismus eingeführt, um im Anschluss anhand der Beugungserscheinungen die Erklärungsmächtigkeit dieses Formalismus im Sinne einer theoriegeleiteten Erfahrungswissenschaft zu demonstrieren (Kapitel 3.2.3). Vielmehr geht das Curriculum von den Erscheinungen aus, durch die sich die Kontrastvervielfachungen rein zeigen: das sind die Erscheinungen am Gitter. Dort bleibt die Erklärung mittels optischer Wege weiterhin möglich; mit den beiden Bedingungen, die an die optischen Wege gestellt werden müssen, wird man den Beugungserscheinungen gerecht.

4.4 Das Sehen im Kontext der Beugung

Auf dem Hintergrund der im vorangegangenen Kapitel dargestellten Teile des Curriculums ist es den Schülerinnen und Schülern möglich, den Umgang mit vielerorts üblichen spektroskopischen Anwendungsaufgaben zur Beugung am Gitter zu lernen. Von daher rundet sich ein er-

ster inhaltlicher Bogen, bei dem man es belassen könnte. Die Beugung wäre dann als eine Situation des Durchblicks bekannt geworden, der Kontext zum Sehen würde den Schülerinnen und Schülern aber nicht deutlich werden. Dieser erschließt sich erst, wenn die Verbindung von Durchblicken und Anblicken aufgesucht wird, zunächst also ein Gitter oder ein Spalt einmal im Durchblick die Kontraste der dabei angeblickten Gegenstände verändert und das andere Mal durch Anblicken auf die Netzhaut abgebildet wird.

Ist diese Verbindung deutlich, so ordnet sich die Beugung in den Kontext des Sehens ein, von dem auch die operationale Definition der optischen Wege ausgeht. Der thematische Bogen schließt und das Verständnis des Sehens vertieft sich. Die dementsprechend angelegte didaktische Elementarisierung mag kumulative Lernprozesse und eine vertikale Vernetzung der Unterrichtsinhalte fördern. Sie wird von daher als notwendiger Bestandteil des Kerncurriculums gesehen.

So wie man im eingebundenen Versuch die Wahl hat, *entweder* ein Gitter bzw. einen Spalt anzublicken *oder* durch sie hindurch auf eine Lampe zu schauen, so kann man in einem abgelösten Versuch ein Gitter oder auch einen Spalt mit Hilfe einer Linse sowohl auf einen Schirm abbilden, als auch mit ihm vervielfältigte Lampenansichten als Beugungsbild hervorrufen. Der experimentelle Eingriff entscheidet, ob man ein Abbild oder ein Beugungsbild sieht. Der Zusammenhang dieser Bilder soll im Folgenden thematisiert werden. Dabei wird - wie schon am Anfang des Kerncurriculums - der Wechsel von eingebundenem und abgelöstem Versuch als didaktisches Mittel eingesetzt (Kapitel 4.2).

4.4.1 Freihandversuch: Vom Durchblick zum Anblick

Der neue thematische Bogen im Gang des Kerncurriculums setzt wieder an einem Freihandversuch mit dem Spalt an. Auch ein Gitter mit so geringer Strichzahl, dass man die einzelnen Striche noch mit bloßem Auge unterscheiden kann, wäre an Stelle des Spaltes möglich. Da die Spalte aber einfacher selber herzustellen sind, werden sich wohl in vielen Fällen diese anbieten.

Man blickt durch einen engen Spalt, den man unmittelbar vor das Auge hält, auf eine Lampe in der Ferne. Es zeigen sich Lampenbilder in regelmäßiger Vervielfachung. Nun vergrößert

man den Abstand des Spaltes zum Auge bis zur deutlichen Sehweite und blickt dabei durch den Spalt weiterhin auf die Lampe. Man sieht fortlaufend das Beugungsbild, allerdings nur den Teil des Beugungsmusters, dem sich das Auge durch die Öffnung seiner Pupille zuwendet. Entsprechend muss man beispielsweise einen vertikalen Spalt nach rechts und links hin- und herschieben, damit nacheinander die verschiedenen Teile des Beugungsmusters erscheinen. (*Versuch 5*). Wechselt man, während man den Spalt durchblickt und symmetrisch zur optischen Achse einige vervielfältigte Lampenbilder noch sieht, von dem beschriebenen Durchblick zum Anblick des Spaltes, indem man entsprechend akkommodiert, so zieht sich das Beugungsbild zusammen. Die dunklen Flächen des Spaltes heben sich jetzt deutlich von einem hellen, nicht weiter differenzierten Hintergrund ab.

Mit dem Wechsel vom Durchblick zum Anblick fällt die Netzhaut des Auges nicht mehr mit der Brennebene der Augenlinse zusammen, vielmehr wird die Ebene des Spaltes jetzt auf die Netzhaut abgebildet. Damit wandert die Brennebene der Linse vor die Bildebene und liegt jetzt in der Augenkammer vor der Netzhaut. Dieser auf MAIER zurückgehende Versuch (siehe *Abbildung 6* in Kapitel 3.1.4) wird im Anschluss als abgelöster Versuch weiter analysiert.

4.4.2 Zusammenfassung von Durchblick und Anblick im abgelösten Versuch -

Optische Filterung und kontextuale Abbildung

Im eingebundenen Versuch kann man vom Durchblick durch einen Spalt oder ein Gitter auf die Lampe zum Anblick des Spaltes oder Gitters übergehen, indem man entsprechend ak-

V 5:

Durch einen Spalt, den man dicht vor das Auge hält, blickt man auf eine Halogenlampe mit kleiner Glühwendel. Die Spaltbreite stellt man so ein, dass man die vervielfältigten Lampenbilder mit deutlichem Abstand zwischeneinander gut unterscheiden kann.

Man entfernt nun den Spalt zunehmend vom Auge, während man durch ihn hindurch weiterhin auf die Lampe blickt. Dabei verringert sich der Umfang des Beugungsmusters, den man noch überblicken kann. Indem man den Spalt jedoch nach rechts oder links verschiebt, erscheinen wieder die vervielfältigten Lampenbilder, welche man mit zunehmendem Abstand vom Auge aus dem Blick verloren hatte. So kann man selbst noch in großer Entfernung zum Auge durch Verschiebung nach rechts oder links sukzessive das ganze Beugungsbild sehen.

Nach diesen Untersuchungen hält man schließlich in einem Abstand von ca. 25 cm vor dem Auge den Spalt an einer Stelle ruhig, an der man Lampenbilder in ihrer Vervielfältigung um die 0. Ordnung herum gruppiert sieht. Nun verändert man die Akkommodation und fixiert die Spaltkanten. In diesem Wechsel verschwindet das Beugungsmuster, die deutlichen Spaltkanten erscheinen.

kommodiert. Dabei ändert man die Form der Augenlinse.

Im abgelösten Versuch steht an Stelle der Augenlinse eine Linse mit fester Form. Will man das Verhältnis von Durchblick und Anblick in *einem* Versuch verfolgen, so muss man mit dieser Linse einerseits die Bedingungen herstellen, unter denen das Beugungsbild erscheint (Durchblick), und andererseits den Spalt oder das Gitter abbilden (Anblick).

In *Abbildung 19* steht die Linse L_3 im Abstand g vom Gitter, wobei g etwas größer als die Brennweite f der Linse gewählt wird. Somit sind die Bedingungen für eine Linsenabbildung erfüllt. Ein scharfes Abbild des Gitters erhält man, wenn man gemäß der Linsengleichung $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ im Abstand b zur Linse einen Schirm aufstellt (Position 2). Wenn die Gegenstandsweite g nur etwas größer als die Brennweite f der Linse ist, erscheint auf dem Schirm ein vergrößertes Abbild des Gitters. Gitter mit 20 oder 40 Strichen pro Zentimeter sind auf diese Weise gut und deutlich zu erkennen.

Stellt man hingegen den Schirm nicht in der Bildweite der Linse L_3 , sondern in ihrer Brennebene auf (Position 1), erblickt man das Beugungsbild des Gitters - bei Verwendung eines Lasers in Form scharfer, regelmäßig angeordneter heller Flecken in Richtung der Periodizität des Gitters. Dieser Position des Schirms entspricht im eingebundenen Versuch der Durchblick. Je nach Position des Schirmes sieht man das Beugungsbild oder das Abbild. Insbesondere nutzt dieser Versuchsaufbau aus, dass Translationen des Gitters das Beugungsbild nicht verändern. So kann man den Abstand zwischen dem Gitter und der Linse L_3 größer als die Brennweite

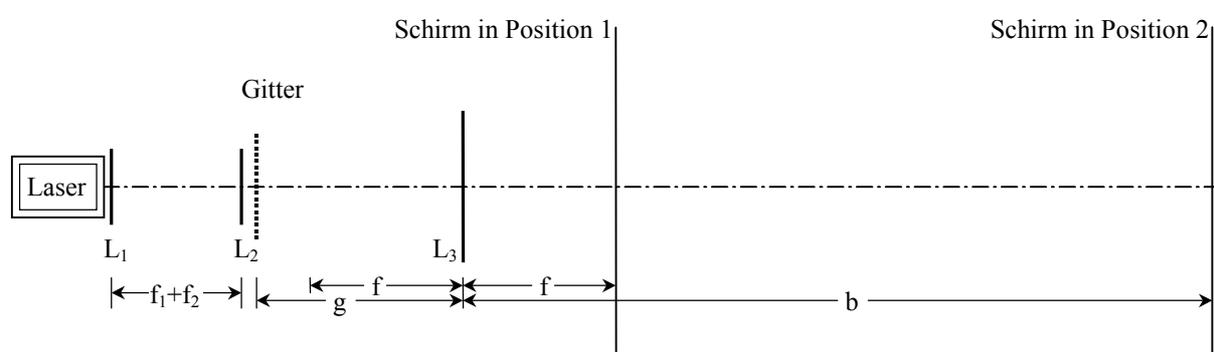


Abb. 19:

Versuchsaufbau für den abgelösten Versuch. In Position 1 sieht man auf dem Schirm das Beugungsbild, in Position 2 das Abbild des Gitters. Mögliche Brennweiten: $f_1 = 5 \text{ mm}$; $f_2 = 30 \text{ cm}$ und $f = 60 \text{ cm}$.

wählen und dadurch die Voraussetzungen für eine Abbildung des Gitters gleichzeitig erfüllen.

Für gewöhnlich ist man dazu geneigt, die Abbildung des Gitters sich so vorzustellen, dass die einzelnen Gitteröffnungen hell sind und den Raum vor dem Gitter nach allen Richtungen hin mehr oder weniger stark erleuchten. So fasst man dann die optische Abbildung durch ein Feld optischer Wege, welches sich kegelförmig von einem Flecken der Gitteröffnung bis zum Linsenrand öffnet und auf der anderen Seite wieder kegelförmig bis zum entsprechenden Bildpunkt zusammenläuft. In dem hier erläuterten Experiment wird aber das Gitter nur aus einer Richtung ausgeleuchtet und auch für den Fall, dass man den Laser durch eine Halogenlampe mit kleiner Glühwendel ersetzte, lägen die Richtungen der Ausleuchtung entsprechend der Kleinheit der Glühwendel sehr nahe beieinander. Dabei gingen die jeweiligen Richtungen der Ausleuchtung des gesamten Gitters jeweils auf das Leuchten des einen, entsprechenden Fleckens der Glühwendel zurück (*Abbildung 15*). - Bei einer solchen, im wesentlichen auf eine Richtung zurückgehenden Ausleuchtung des Gitters sind die Kontrastvervielfachungen infolge des Gitters gut zu verfolgen. Es überlagern sich nicht die Kontrastvervielfachungen durch die Ausleuchtung aus vielen Richtungen zu einer diffusen Flächenhelligkeit (Ende des Kapitels 4.3.3). An die Stelle eines kegelförmig sich öffnenden Feldes optischer Wege muss jetzt ein Feld optischer Wege treten, welches die tatsächlichen Kontrastvervielfachungen charakterisiert: Die Richtungen der optischen Wege innerhalb dieses Feldes werden durch die beiden Bedingungen festgelegt, wie sie in Kapitel 4.3.3 für die optischen Wege formuliert sind. Durch die speziellen Bedingungen dieses Versuches, der Beugungs- und Abbildung zusammenfasst, darf also nicht von einer isotropen Ausleuchtung der Linse durch die hellen Streifen des Gitters ausgegangen werden, vielmehr tritt eine anisotrope Struktur durch die Kontrastvervielfachung des Gitters auf, die bestimmte Richtungen auszeichnet.

In *Abbildung 20* sind für die nullte und für die beiden ersten Beugungsordnungen der entsprechende Verlauf der optischen Wege zusammengefasst. Sie zeigen exemplarisch den Zusammenhang zwischen Beugungs- und Abbildung auf; zu Gunsten einer größeren Übersichtlichkeit wurde auf weitere Beugungsordnungen verzichtet.

Aus dieser Charakterisierung des Zusammenhangs von Beugungs- und Abbildung mittels optischer Wege erkennt man, wie die verschiedenen Gitteröffnungen zugeordneten optischen Wege einer Richtung *alle* zu der entsprechenden Beugungsordnung beitragen und umgekehrt alle

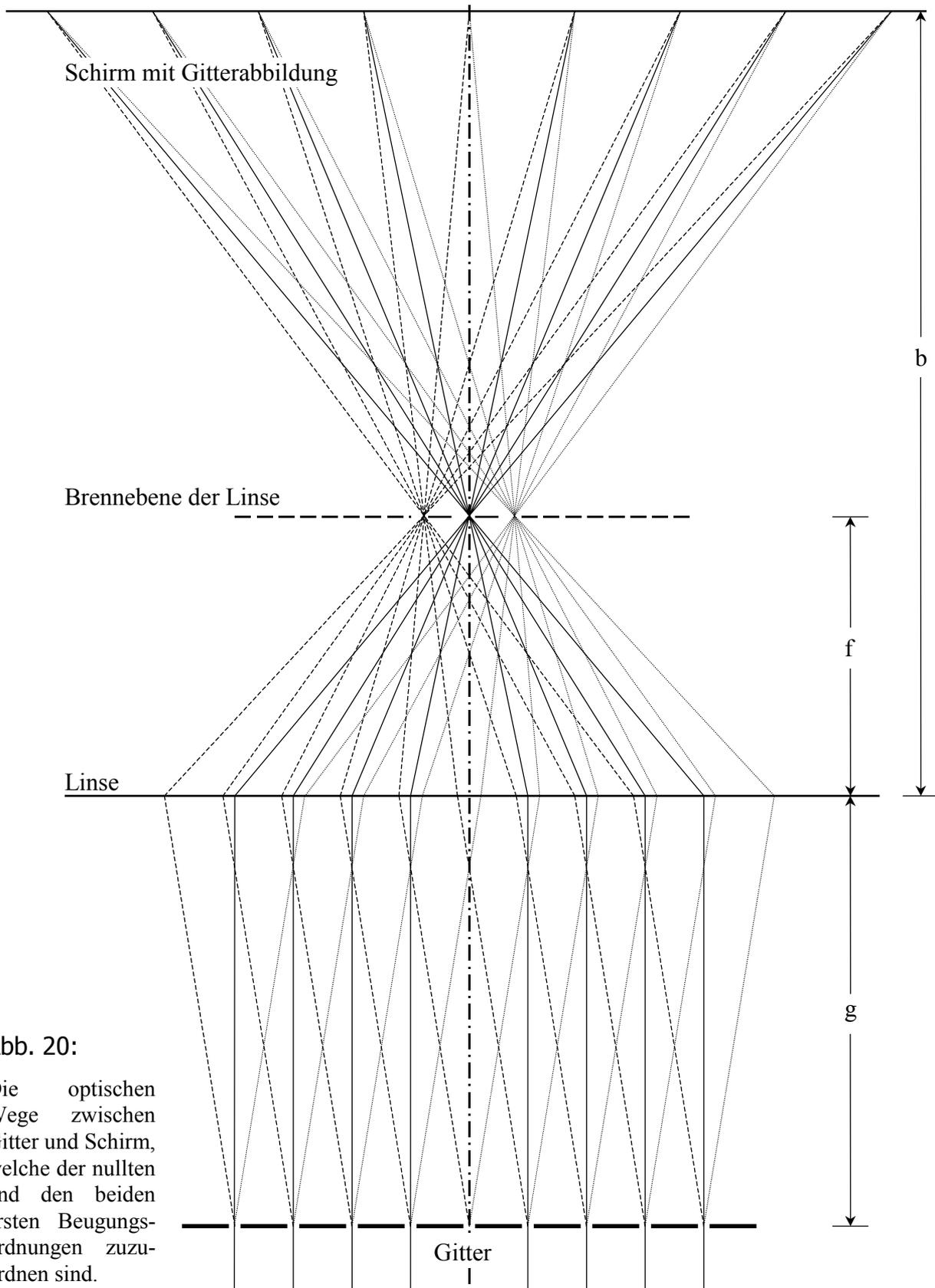


Abb. 20:

Die optischen Wege zwischen Gitter und Schirm, welche der nullten und den beiden ersten Beugungsordnungen zuzuordnen sind.

in einer Beugungsordnung zentrierten optischen Wege für die Abbildung des *gesamten* Gitters maßgeblich sind. Der Kontext des gesamten Gitters ist mit den einzelnen Beugungsordnungen verbunden, wie die einzelne Beugungsordnung im Kontext des gesamten Abbildes steht.

Durch ein weiteres Experiment kann deutlich werden, wie die Gesamtheit des Gitters das Beugungsbild bestimmt. Dazu stellt man bei einem Versuchsaufbau gemäß *Abbildung 19* den Schirm in Position 1 und fügt zwischen die Linse L_2 und dem Gitter noch einen Spalt ein. Das Gitter hat 100 Striche pro cm, der Spalt ist zunächst voll geöffnet mit einer Breite von ca. 3 mm. Nun reduziert man die Spaltbreite langsam und verfolgt die Veränderungen des Beugungsbildes: Die Helligkeit des Beugungsbildes nimmt ab; unterschreitet die Spaltbreite einen Millimeter so verändert sich gleichzeitig auch das Muster des Beugungsbildes. Die klare Struktur äquidistanter heller Flecken löst sich auf, sie wird unregelmäßiger.

Für die Struktur des Beugungsbildes ist nicht nur wesentlich, in welchem Abstand die Gitterstege sich befinden und wie groß die Gitteröffnungen sind, sondern auch, wie viele der Stege durchleuchtet werden. Damit kann man ein weiteres Mal bemerken, wie der Kontext des gesamten Gitters für die Ausbildung des Beugungsbildes wesentlich ist. Es darf das Gitter nicht als Addition einzelner Elemente, der Gitterstege, gedacht werden, wodurch mit jedem Gittersteg Gleichartiges dazukommt, sondern vielmehr ist der Kontext des gesamten ausgeleuchteten Gitters wirksam. Es liegt im Übergang vom durchleuchteten Gitter zum Beugungsbild eine *kontextuale Abbildung* vor.

Der Begriff der kontextualen Abbildung wird an dieser Stelle des Curriculums eingeführt, um den weiteren Unterricht zur Quantentheorie von der Denkweise her vorzubereiten. Nicht nur methodisch, indem Beobachtungshandlungen für Erscheinungen formuliert werden, sondern auch inhaltlich. Indem die Schülerinnen und Schüler schon an der Beugung lernen, inwiefern Gesamtheiten Bedingungen im Experiment darstellen können, lernen sie Begriffe der Quantentheorie im Physikunterricht kennen, bevor diese Theorie explizit thematisiert wird. Der phänomenologische Ansatz legt hier durch Erscheinungsreihen Begriffe nahe, die sich auch im Rahmen der Quantentheorie als tragfähig erweisen. Diese Möglichkeit einer vertikalen Vernetzung der Unterrichtsinhalte soll ausgenutzt werden.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch angefügt, dass mit dem Auflösen der regelmäßigen Struktur des Beugungsbildes durch Reduktion der ausgeleuchteten Gitteröffnun-

gen das Experiment es erforderlich macht, nicht mehr nur vielfältige Strukturen und deren Lage zu untersuchen, sondern dass jetzt Intensitätsverläufe zu analysieren sind. Insofern kann das oben dargestellte Experiment eine Brücke zum Doppelspalt bilden, wo der Intensitätsverlauf des Beugungsbildes den Zeigerformalismus nahelegt. Darauf soll an entsprechender Stelle innerhalb der Erweiterungsmodule des Kerncurriculums eingegangen werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Beziehung zwischen Beugungsbild und Abbild zu untersuchen, ist durch Experimente zur optischen Filterung gegeben. Bei einem Versuchsaufbau gemäß *Abbildung 19* steht der Schirm in Position 2 und in der Brennebene der Linse L_3 werden einzelne Beugungsordnungen ausgeblendet und die Veränderungen des Abbilds beobachtet.

Bei einem Gitter mit 40 Strichen pro Zentimeter liegen die verschiedenen Ordnungen im Beugungsbild recht eng nebeneinander, so dass man am Ort des Beugungsbildes einen voll geöffneten Spalt symmetrisch zur optischen Achse aufstellen kann und dieser dann nur wenige Beugungsordnungen ausblendet. Nun verringert man schrittweise die Spaltöffnung und beobachtet die Veränderungen der Gitterabbildung auf dem Schirm.

Zunächst wird man keine Veränderungen der Gitterabbildung bemerken, auch wenn einzelne Beugungsordnungen schon ausgeblendet wurden. Lediglich eine sanfte Abdunklung der Abbildung ist zu erahnen. Sobald aber die Beugungsbilder 2. Ordnung ausgeblendet sind, wird

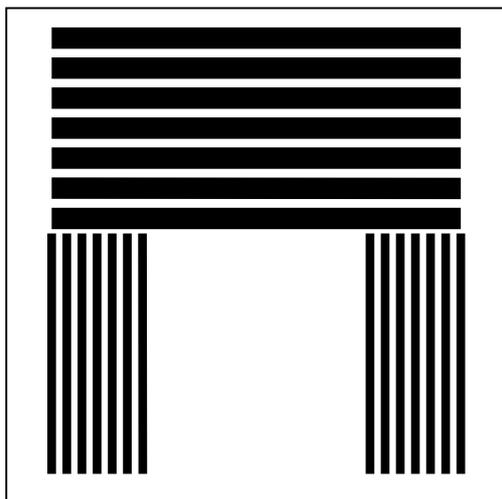


Abb. 21:

Die zueinander senkrechten Richtungen der Gitter dieses Musters führen zu einem kreuzförmigen Beugungsbild, das besonders einfach manipuliert werden kann.

die Abbildung nicht nur dunkler, sondern vor allem auch unschärfer. Mit Ausblendung der Beugungsbilder 1. Ordnung erscheint das Abbild schließlich vollständig konturlos, man sieht einen diffusen hellen großen Fleck.

Verwendet man an Stelle des Gitters ein Muster wie es in *Abbildung 21* vorgegeben ist, so bilden im Beugungsbild die vielfältigen hellen Flecken entsprechend der Laserbeleuchtung ein Kreuz. Mit einem Spalt kann man nun entweder die hellen Flecken auf der einen oder der anderen Kreuzachse ausblenden.

Blendet man beispielsweise schrittweise die auf einer

Vertikalen auftretenden vervielfachten Lampenbilder aus, so werden die horizontalen, periodisch angeordneten Balken des Abbilds zunehmend unscharf. Die vertikalen Balken bleiben hingegen deutlich sichtbar, sofern der Spalt nicht die zugehörigen, auf einer Horizontalen angeordneten Beugungsordnungen verdeckt. Scharfer Kontrast im Abbild tritt offenbar nur dann auf, wenn in der Brennebene eine ausreichende Anzahl vervielfältigter Lampenansichten an der Abbildung teilnimmt.

Bei einem Gitter mit 40 Strichen pro cm kann man in einem weiteren Versuch auch jede 2. Beugungsordnung ausblenden. Dann entspricht das noch wirksame Beugungsbild dem eines Gitters mit halber Gitterkonstanten, also 80 Strichen pro cm. Im Abbild beobachtet man durch diese Manipulation tatsächlich eine Verdopplung der Gitterstriche. Für weitere Experimente zur optischen Filterung wie auch die Bildentstehung im Mikroskop nach E. ABBE (1873) kann man auf die Literatur zurückgreifen (BERGMANN 1993; RESCH 1981). Ein für Schüler interessanter Anwendungsbezug der optischen Filterung ist die Entfernung ungewollter periodischer Strukturen in Fotografien. So können beispielsweise Gitterstäbe vor dem Gesicht von Personen durch Ausblenden der dazugehörigen Beugungsordnungen entfernt werden.

Die hier vorgestellte Untersuchung des Sehens im Kontext der Beugung schränkt die Untersuchungen auf den Fall ein, dass die Be- oder Ausleuchtung der *gesamten* angeblickten Struktur im Idealfall auf einen Fleck der Lampe zurückgeht und *alle* optischen Wege zwischen diesem Fleck der Lampe und der Struktur *gleich lang* sind. Im Wellenmodell würde das einer auf Kohärenz hin optimierten Beleuchtung entsprechen. Diese Reduktion des Experimentes gegenüber den alltäglichen Situationen bringt den Vorteil, dass der Einfluss der angeblickten Struktur im Kontext des Sehens deutlich wird, ohne dass die nur partielle Ausleuchtung des Gitters durch unterschiedliche Lampen oder große Wegunterschiede der optischen Wege die Wirksamkeit der Struktur in einer diffusen Flächenhelligkeit untergehen lassen. - Die Transformation des durchleuchteten Gitters zum Beugungsbild wird im Wellenmodell durch eine FOURIER-Transformation dargestellt, die vom Beugungsbild zum Abbild als die entsprechende Rücktransformation. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Transformation können hier mittels der oben dargestellten Versuche zur optischen Filterung verstanden werden, ohne dass man auf das Wellenmodell oder die FOURIER-Transformation explizit Bezug nehmen muss.

Vielmehr stellt sich nun das Sehen wie folgt dar: Der scharfe Kontrast eines periodischen Gitters bedingt in der Brennebene eine regelmäßige Anordnung vervielfachter scharfer Lampenbilder. Wenn man die Möglichkeit, dass in der Brennebene diese vervielfachten Lampenbilder erscheinen könnten, nicht durch Blenden verbaut, erscheint in der Bildebene ein ebenfalls scharf kontrastiertes Abbild. Im Beugungsbild werden bestimmte Richtungen im Ensemble des Versuchsaufbaus ausgezeichnet. Zu der ebenen, periodischen Gestalt des Gitters tritt durch das Beugungsbild eine Konfiguration hinzu, die Richtungen auszeichnet. Diese „Richtungskonfiguration“ bedingt ihrerseits, wie deutlich ein Abbild als ebene, periodische Gestalt erscheint. - Im Allgemeinen sind ihr die Regelmäßigkeiten oder Periodizitäten des ganzen abgebildeten Gegenstandes eingeschrieben.

Im Vergleich von Beugungsbild und Abbild taucht man in ein Gefüge sich bedingender Erscheinungen ein. Dieser Bedingungs-zusammenhang ist geometrisch im Konzept optischer Wege fassbar. Auch fallen einige Zusammenhänge, wie die Tatsache, dass die Abstände einzelner Gitterstege sich reziprok zu den Abständen der Lampenansichten im Beugungsbild verhalten, bald dem Beobachter auf. Aber erst, indem man immer wieder sich in einzelne Beispiele eindenkt, entsteht ein Gespür dafür, wie differenziert dieses Beziehungsgefüge ist. Eine oft anzutreffende Vorstellungsart, dass die Ansichten der Dinge um uns punktweise zu uns hin transportiert werden, greift die Sache in ihrer Tiefe nicht. Indem die Schülerinnen und Schüler von verschiedenen Seiten sich anfänglich in die Komplexität der Beugungserscheinungen einarbeiten, vertieft und strukturiert sich die Wissensbasis zur optischen Abbildung neu. Dabei erfahren sie gleichzeitig gedankliche Ansätze, die sie auf die Quantentheorie vorbereiten. Die Beugung bildet dann eine Brücke hin zur Physik des 20. Jahrhunderts und ordnet gleichzeitig die genannte Wissensbasis neu. Sie hilft so, dass die Schülerinnen und Schüler die Physik als ein einheitliches Gedankengebäude erleben können. Daraus mag nicht zuletzt die Rechtfertigung kommen, dem Thema Beugung einen hinreichenden Umfang im Schulunterricht einzuräumen.

Am Ende des Kerncurriculums zur Beugung bemerkt man schließlich, dass die zunächst angenommene geradlinige Sicht nur möglich ist, wenn um die Blickrichtung herum bis zum Rand der Iris keine undurchsichtigen Begrenzungen vorliegen. Umgekehrt zeigt sich im Falle einer Begrenzung der Sicht der Umfang dieser Begrenzung im Beugungsbild. Die streng zu

lokalisierende Sichtverbindung gibt es nicht! Ohne eine Öffnung in die Umgebung kommt kein Sehen und kein Beleuchtungszusammenhang zustande. Die eindeutige und lokale Begrenzung durch Blenden führt zur Weitung im Beugungsbild, wie die Weite der Linsenöffnung eine eindeutige Punkt-zu-Punkt-Beziehung zwischen Gegenstand und Abbild ermöglicht. Die Eindeutigkeit der optischen Abbildung muss demnach mit der Gesamtheit des Versuchsaufbaus als *ein* Zusammenhang gedacht werden, wie auch zu dem gesamten Gegenstand mit seinen Regelmäßigkeiten die Weite des Beugungsbildes gehört.

Was später im Verlauf des Physikunterrichtes die Schülerinnen und Schüler in formalerer Weise als HEISENBERGSCHER Unbestimmtheitsrelation oder als Komplementarität kennenlernen, wird hier schon in einem mehr qualitativen Kontext erübt. Die Denkweise der Quantentheorie wird in einem Rahmen angelegt, der den Erscheinungen nahe steht.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kerncurriculums

Die Ergebnisse des hier vorgestellten Kerncurriculums zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege lassen sich auf dem Hintergrund der vorangegangenen Kapitel für ein Gitter wie folgt zusammenfassen:

- Das Gitter wird - im Idealfall - nur aus einer Richtung beleuchtet. Die Lampe muss dafür im Brennpunkt (bzw. in der Brennebene) einer Linse stehen. Die Beleuchtung geht so auf den Leuchtprozess eines Ortes der Lampe zurück. Der Kontrast der Gitterstege des durchleuchteten Gitters wird dann vervielfacht und zeigt sich als eine Richtungsstruktur, bei der die Richtungen der vervielfachten Kontraste von der Gitterkonstanten abhängen. Eine Linse bildet gemäß dieser Richtungsstruktur vervielfachte Lampenansichten als Beugungsbild ab. Die Richtungsstruktur und die Ausleuchtung des Gitters sind im Konzept optischer Wege zu beschreiben: Zwischen dem für die Ausleuchtung maßgeblichen Ort der Lampe und dem Gitter sind alle optischen Wege gleich lang. Zwischen dem Gitter und Beugungsbild unterscheiden sich für benachbarte Gitteröffnungen die Längen optischer Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$. Die optischen Wege *einer* Gitteröffnung sind für eine Beugungsordnung alle gleich lang.

- Die Struktur des Beugungsbildes hängt davon ab, welcher Anteil des Gitters, zurückgehend auf einen Flecken der Lampe, als Ganzes durchleuchtet wird. Die *Gesamtheit* des so durchleuchteten Gitters bestimmt das Beugungsbild. Insofern handelt es sich um eine kontextuale Abbildung.
- Der Zusammenhang zwischen Beugungs- und Abbild eines Gitters und insbesondere die Experimente zur optischen Filterung zeigen, dass das Beugungsbild *als Ganzes* das Abbild bestimmt, wie schon das Gitter *als Ganzes* das Beugungsbild bestimmt. Die kontextuale Abbildung wird auch hier aufgefunden. - Die operationale Definition der optischen Wege geht von Blickwegen oder Schattengrenzen aus. Im Rahmen dieser Definition könnte man geneigt sein, streng zu lokalisierende Blickwege oder Schattengrenzen anzunehmen, die man auch ggf. experimentell präparieren möge. Gerade die zuletzt genannten Experimente zur Beugung bestätigen aber, auf was schon bei der Definition der optischen Wege ausdrücklich hingewiesen worden ist: die optischen Wege sind *gedankliche* Ordnungselemente, die grundsätzlich nicht in isolierter Form experimentell zu präparieren sind, gehörte doch zu einer experimentellen Präparation in Form von Blenden die entsprechende Weite des Beugungsbildes dazu.

5 Die Beugung im Konzept optischer Wege – Erweiterungsmodule zum Kerncurriculum

Das Kerncurriculum kann nach verschiedenen Richtungen hin vertieft werden. In diesem Kapitel werden mögliche Wege und Inhalte in Form von Erweiterungsmodulen dargestellt, mit denen man auf der Basis des im Kerncurriculum Gelernten die Brücke zu anknüpfenden physikalischen Themen schlagen kann.

Je nach Lerngruppe oder didaktischer Zielrichtung bieten sich unterschiedliche Erweiterungsmodule an: Möchte man beispielsweise die Tragfähigkeit der optischen Wege als Beschreibungsansatz unterstreichen, ist es sinnvoll, Rotationen des Gitters zu besprechen. Sucht man hingegen einen anschaulichen Weg zur Kristall- oder Festkörperphysik, so mag man das Modul reziprokes Gitter und EWALD-Kugel behandeln. Das zuletzt genannte Modul ist vom Schwierigkeitsgrad her im Übergang von den Lehrveranstaltungen der Schule zu denen der Universität angesiedelt, während die anderen Module für die Schule konzipiert sind. Insbesondere ist es denkbar, auf das Modul reziprokes Gitter und EWALD-Kugel im Rahmen der Lehrerbildung an der Universität zurückzugreifen.

5.1 Rotationen der Gitters: LAUE-Kegel

Die im Kerncurriculum entwickelten beiden Bedingungen an die optischen Wege, welche im Kontext der Beugungserscheinungen mit Gittern gefordert werden müssen ($\delta_n = n \cdot \lambda$ und gleich lange optische Wege innerhalb einer Gitteröffnung, Kapitel 4.3.3), erweisen sich als ein für die dort vorgestellten Versuche durchgängig tragfähiger Beschreibungsansatz. Als Besonderheit dieser Versuche muss festgehalten werden, dass dabei das Gitter immer senkrecht zur optischen Achse oder zur Richtung der Durchleuchtung steht. Sobald man auf diese experimentelle Vorgabe verzichtet und Rotationen des Gitters zulässt, verändern sich die entsprechenden Beugungsbilder. Die vielfältigen Lampenansichten gruppieren sich zum Teil in der Form von Kegelschnitten und für die Lernenden entsteht die Frage, ob weiterhin die Bedingungen an die optischen Wege zur Beschreibung genügen.

Da als Ergebnis der genannten Fragestellung sich zeigen wird, dass auch bei Rotationen des Gitters die im Kerncurriculum formulierten Bedingungen an die optischen Wege zur Beschreibung ausreichen, unterstützt dieses Erweiterungsmodul die Wahrnehmung der Physik als einheitliches Gedankengebäude. Außerdem legt es eine fachübergreifende Behandlung zusammen mit dem Mathematikunterricht nahe, weil die Formen des Beugungsbildes als Kegelschnitte hier vielfältige Anknüpfungspunkte bieten und insbesondere die unterschiedlichen Stellungen des Gitters den Schnitten einer Ebene mit einem Kegel in unterschiedliche Richtungen zugeordnet werden können.

5.1.1 Versuche zu Rotationen des Gitters

In Anlehnung an die Freihandversuche des Kerncurriculums blicken die Schülerinnen und

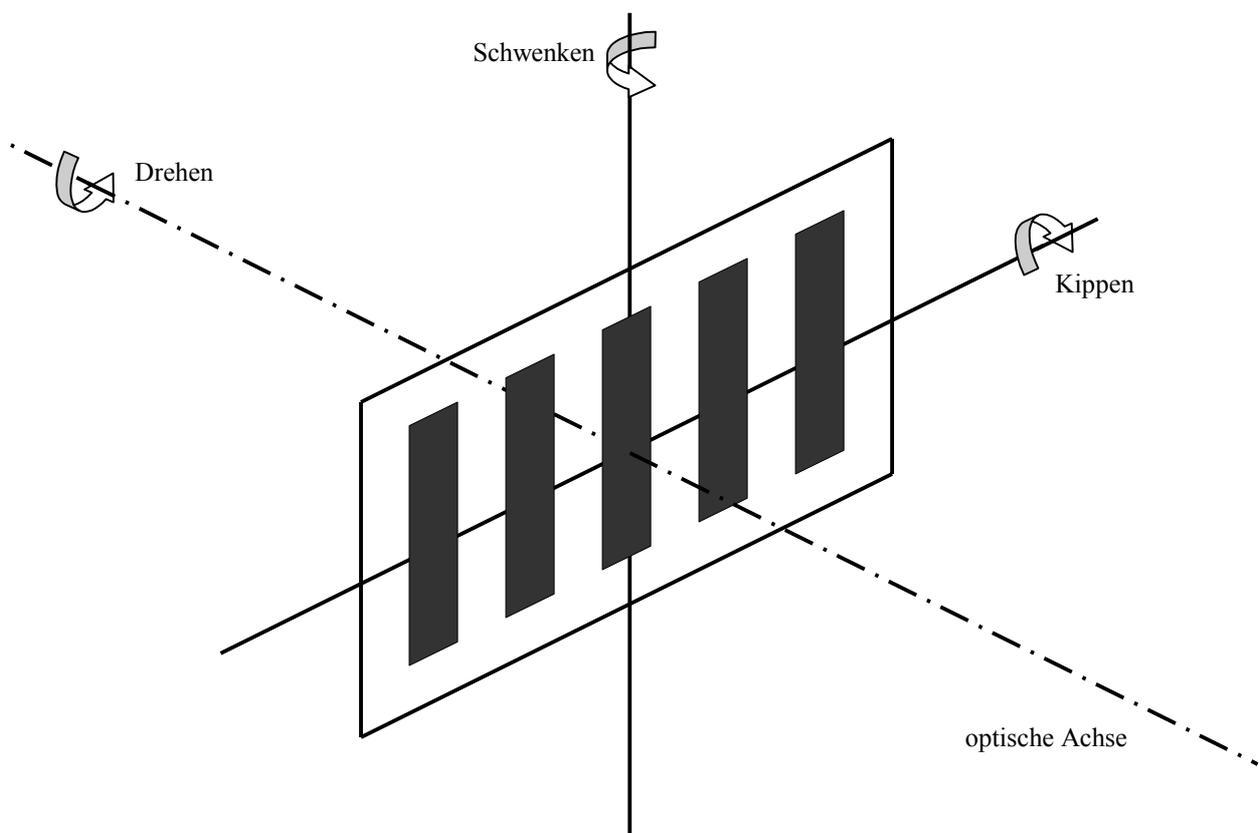


Abb. 22:

Die drei Rotationen des Gitters: Drehen, Schwenken, Kippen.

Schüler durch ein Strichgitter auf eine Halogenlampe mit kleiner Glühwendel, die in einer Entfernung von einigen Metern vor ihnen steht. Für diesen Versuch kann man als Klassensatz sehr preisgünstig zu erwerbende Transmissionsgitter verwenden, wie sie in (UCKE 1999) vorgestellt werden. (Brillen für 3D-Effekte auf Grundlage der chromatischen Aberration).

Wenn ein solches Strichgitter ($g \approx 32 \mu\text{m}$) so vor ein Auge gehalten wird, dass die Gitterstäbe zunächst senkrecht stehen, und man dann das Gitter um eine horizontale Achse in der Gitterebene kippt (die untere, waagrechte Kante des Gitters kippt also zu dem Beobachter hin, die obere von ihm weg), sieht man das Band der vervielfältigten Lampenbilder nicht mehr auf einer horizontalen Geraden liegen. Es verbiegt sich vielmehr zu einer beidseitig nach oben geschwungenen Linie, deren Scheitel in der Blickrichtung nach der Lampe liegt und deren Form an eine Parabel oder einen Hyperbelast erinnert. Je weiter man das Gitter dreht, umso enger wird die Öffnung dieser Linie. Ändert man die Rotationsrichtung des Gitters, so wird in der senkrechten Gitterstellung wieder ein horizontales Beugungsbild durchlaufen, das sich bei weiterer Drehung des Gitters zu einer nach unten geschwungenen Linie abwandelt.

Demgegenüber bleiben Drehungen um andere Achsen wenig sensationell. Dreht man das Gitter um eine senkrecht zur Gitterebene stehende Achse, dreht sich das gewohnte Beugungsbild so mit, dass es stets senkrecht zu den Gitterstäben steht. Schwenkt man um eine zu den Gitterstäben parallele Achse, zeigt sich, was bereits von der Verjüngung des einzelnen Spaltes bekannt ist: das Beugungsbild weitet sich nach beiden Seiten auf.

Neben der Transformation des scharfen Kontrastes einer Lampe zu regelmäßig vervielfachten Lampenbildern treten also vor allem beim Kippen Erscheinungen auf, die das Interesse fesseln:

- Sind es wirklich Kegelschnitte, auf denen die vervielfältigten Lampenbilder im Beugungsbild liegen, wenn das Gitter rotiert?
- Auf welcher Ortskurve wandern dabei die einzelnen Lampenbilder?



Abb. 23:

Beugungsbilder für verschiedene Kippwinkel des Gitters.

Für die Analyse bzw. Klärung dieser Fragen bietet es sich an, zunächst von den Freihandversuchen zu den entsprechenden abgelösten Versuchen überzugehen. Dazu wählt man einen Aufbau mit Laser, wie er in *Abbildung 17* in Kapitel 4.3.3 dargestellt ist, oder man durchleuchtet das Gitter direkt mit einem Laser. Im Einzelnen ergibt sich:

1. Drehen:

Die Rotationsachse steht senkrecht zur Gitterebene (*Abbildung 22*). Das Beugungsbild folgt unmittelbar den Drehungen des Gitters. Es erstreckt sich stets senkrecht zur Richtung der Gitterstege. Die nullte Ordnung bleibt fest. Die Abstände der einzelnen Lampenbilder untereinander ändern sich nicht.

Die Bedingungen, dass sich die optischen Wege benachbarter Gitteröffnungen um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden, für eine bestimmte Gitteröffnung aber alle Wege gleich lang sind, legen auch hier die Lage der Lampenbilder im Beugungsbild fest.

2. Schwenken:

Die Rotationsachse liegt parallel zu den Gitterstegen bzw. Öffnungen (*Abbildung 22*). Die einzelnen Lampenbilder erstrecken sich weiterhin auf einer Geraden senkrecht zu den Gitterstegen. Die nullte Ordnung bleibt fest. Hingegen bewegen sich alle anderen Lampenbilder von der nullten Ordnung weg, allerdings so, dass sie rechts und links der nullten Ordnung unterschiedlich schnell auseinander laufen.

Die Linsenfassung der Linse L_3 begrenzt unter Umständen den Versuch. Wenn man sich an den etwas größeren hellen Flecken auf dem Schirm nicht stört, kann man alle Linsen einfach weglassen. Eine Untersuchung dieser Rotation bietet sich im Zusammenhang mit der EWALD-Kugel besonders an und soll dort auch detaillierter besprochen werden (Kapitel 5.4.1).

3. Kippen:

Die Rotationsachse liegt in der Gitterebene, senkrecht zu den Gitterstegen (*Abbildung 22*). Insbesondere wenn man die Einschränkungen der Linsenfassung von L_3 vermeidet (vgl. 2. Schwenken), kann man in einem weiten Bereich verfolgen, wie die Lampenbilder auf annähernd senkrechten Linien nach oben oder unten wandern, je nachdem, in welche Richtung man kippt. Die Gesamtheit der Lampenbilder liegt auf einer geschwungenen Linie, welche an

einen Hyperbelast oder eine Parabel erinnert. Je weiter man kippt, umso stärker wird die Krümmung. Ein weiteres Beugungsbild: das der *Spiegelung* in den rückwärtigen Raum, tritt im Blickfeld auf. Schließlich wandern bei fortgesetzter Gitterdrehung die Lampenbilder beider Beugungsbilder, das der direkten Beleuchtung und das der Spiegelung, im vorderen Halbraum zusammen. Sie bilden nun eine geschlossene Linie, die an eine Ellipse erinnert⁷. Je weiter man das Gitter dreht, umso kleiner wird der „Ellipsenumfang“ und es tragen immer weniger Lampenbilder zum Beugungsbild bei; d.h. höhere Ordnungen gehen nach und nach verloren (*Abb. 23*). Mit einigem Erstaunen realisiert man so, dass man bis jetzt vielleicht das Beugungsbild der Spiegelung entweder nie beachtet hat, oder dass man stets Versuchsbedingungen wählte, in denen es nur sehr eingeschränkt erscheinen kann (MAIER 1990).

5.1.2 Auswertung der Versuche zu Rotationen des Gitters

Die Auswertung der Versuche zu Rotationen des Gitters und die Erklärung der Verwandlungen des Beugungsbildes setzten an den beiden Bedingungen an, welche im Rahmen des Kerncurriculums für die optischen Wege eines Beugungsbildes n -ter Ordnung herausgearbeitet werden (Kapitel 4.3.3).

Die Mannigfaltigkeit aller optischen Wege, welche durch die 1. Bedingung festgelegt wird, ist dabei weitaus umfassender als die Gesamtheit der optischen Wege, welche der 1. und 2. Bedingung genügen. Dafür sei zunächst für ein bestimmtes, festes n die 1. Bedingung betrachtet: Die Längen aller optischen Wege benachbarter Gitteröffnungen müssen sich um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden. Hierzu greift man sich zwei optische Wege benachbarter Gitteröffnungen heraus; diese optischen Wege sollen die Gitterebene auf einer zu den Gitterstegen senkrechten Achse a schneiden (*Abb. 24*). Der Bedingung $\delta_n = n \cdot \lambda$ genügen diese optischen Wege bei einem senkrecht stehenden Gitter nicht nur, wenn sie horizontal liegen, sondern auch, wenn sie um die Achse a unter Beibehaltung der Bedingung $\delta_n = n \cdot \lambda$ rotieren und dabei an den Schnittpunkten mit der Gitterebene abknicken. Diese 1. Bedingung ist für diese beiden opti-

⁷ Wie *Abb. 22* zu entnehmen ist, wird bei Kippwinkeln größer 45° der Laserstrahl durch die Reflexion am Gitter um mehr als 90° abgelenkt, verläuft er doch vor dem Gitter horizontal und steht doch das Gitter zu Beginn senkrecht. Bei einem Kippwinkel von 45° trifft er demnach an die Decke. Entsprechend erreicht der gespiegelte Laserstrahl mit zunehmendem Kippen schließlich den Schirm. Dort kommen dann die Beugungsbilder in Transmission und in Reflexion zusammen.

Die erste Bedingung kann man durch einen Kegel darstellen, dessen Achse in der Gitterebene senkrecht auf der Richtung der Gitteröffnungen steht und dessen Spitze in einer Gitteröffnung liegt. Solche Kegel werden nach MAX VON LAUE LAUE-Kegel genannt. Die zweite Bedingung stellt man durch eine Ebene dar, welche die Kegelachse a enthält und senkrecht zum Gitter steht. Durch den Schnitt der entsprechenden LAUE-Kegel mit dieser Horizontalebene sind für ein Gitter, welches senkrecht zur optischen Achse steht, die Richtungen der vervielfältigten Lampenbilder im Beugungsbild festgelegt – und zwar beide: das Beugungsbild in *Durchsicht* durch das Gitter und in *Spiegelung*. Die geometrische Analyse lässt sich hier also auf den Schnitt der LAUE-Kegel mit einer Ebene reduzieren.

Wie sind nun bei Kippung des Gitters um die Achse a (3. *Rotation*) die Überlegungen anzupassen? - Die 1. Bedingung kann man unverändert übernehmen, wird doch das Gitter gerade um die Achse a gedreht, die auch Achse der LAUE-Kegel ist. Deren Lage ändert sich nicht. Für die 2. Bedingung, welche alle optischen Wege *einer* Gitteröffnung betrifft, muss man hingegen nun das Zusammenspiel von Wegabschnitten vor und hinter dem Gitter betrachten. Dafür geht man zunächst gemäß *Abbildung 25* von einer Seitenansicht auf den Versuchsaufbau aus, bei der das Gitter um 40° (Kippwinkel $\varphi = 40^\circ$) um die Achse a gedreht ist. Durch den Punkt A läuft senkrecht zur Blattebene die Achse a .

Zunächst beschränkt man sich auf zwei optische Wege 1 und 2, welche zu einer bestimmten Gitteröffnung gehören und übereinander liegen. Der Weg 1 ist vor dem Gitter um die Strecke V_1G_1 länger als der Weg 2, welcher dafür hinter dem Gitter um die Strecke G_2H_2 länger ist als Weg 1. Von V_1 und G_2 bis zum Laser sind die optischen Wege gleich lang, wie auch von G_1 und H_2 die optischen Wege bis zum Schirm die gleiche Länge aufweisen.

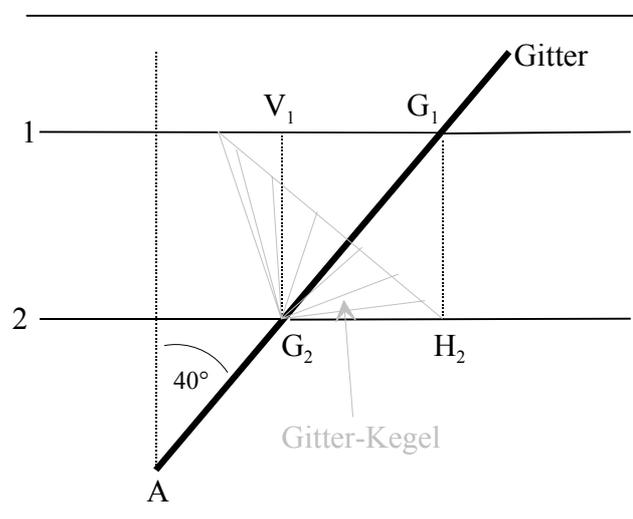


Abb. 25:

Seitenansicht für ein Gitter, das um 40° gedreht wurde zusammen mit zwei optischen Wegen. Die optischen Wege 1 und 2 können hinter dem Gitter abknicken. Dabei müssen die Wegabschnitte V_1G_1 und G_2H_2 gleich lang bleiben und außerdem G_1H_2 stets senkrecht auf G_2H_2 stehen. Es ergibt sich der Gitterkegel.

Da auf dem Schirm in der Brennebene der Linse L_3 vervielfältigte Lampenbilder zu sehen sind, müssen hinter dem Gitter die optischen Wege weiterhin parallel laufen. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Strecke G_1H_2 senkrecht auf den Wegen 1 und 2 hinter dem Gitter steht. - Die Bedingung gleicher Längen für die Wege 1 und 2 ist demnach so zu fordern, dass zum einen die Strecken V_1G_1 und G_2H_2 gleich lang sind und zum anderen die Strecken G_1H_2 und V_1G_2 senkrecht zu den optischen Wegen stehen. Die eben genannten Bedingungen bleiben auch dann erfüllt, wenn das Dreieck $G_1G_2H_2$ so rotiert, dass G_1 und G_2 fest sind, H_2 aber so wandert, dass der Winkel $90^\circ - \varphi$ zwischen G_1G_2 und der Strecke G_2H_2 erhalten bleibt. Die Strecken G_2H_2 bilden dann die Mantellinien eines Kegels, dessen Achse die Richtung der Gitteröffnung ist (G_1G_2) und dessen Winkel der Ergänzungswinkel zu 90° des Kippwinkels φ ist.

Würden wir alle parallelen optischen Wege, welche zwischen den Wegen 1 und 2 bzw. darüber und darunter liegen, zulassen, so erhielte man eine entsprechende Kegelschar. Da für Beugungsbilder die Richtungen wesentlich sind, in welchen die optischen Wege bestimmten Bedingungen genügen, kann man sich auch hier auf einen Kegel beschränken. Dieser fasst alle Richtungen zusammen, die durch die Bedingung gleich langer optischer Wege innerhalb einer Gitteröffnung festgelegt sind. Er soll als *Gitterkegel* bezeichnet werden.

Damit folgt für die 3. *Rotation* aus der Bedingung gleich langer optischer Wege innerhalb einer Gitteröffnung, dass die Richtungen *aller* Lampenbilder des Beugungsbildes auf dem Mantel eines Kegels liegen, dessen Spitze an einer beliebigen Stelle einer Gitteröffnung liegt und dessen Öffnungswinkel 90° vermindert um den Kippwinkel φ beträgt (Findet keine Kippung statt, $\varphi = 0$, so entartet der Kegel zu einer Ebene senkrecht zum Gitter; wir haben die oben beschriebene Situation erreicht). Die Richtungen einzelner Lampenbilder des Beugungsbildes müssen *zusätzlich* der Bedingung $\delta_n = n \cdot \lambda$ gehorchen. Diese Bedingung führt auf die LAUE-Kegel. Fallen nun die Spitzen der LAUE-Kegel mit der des Gitter-Kegels zusammen, *so ergeben die Schnitte dieser Kegel die Richtungen, für welche die optischen Wege beide Bedingungen zugleich erfüllen*. In *Abbildung 26* sind die Schnitte der LAUE-Kegel mit dem Gitterkegel angegeben. *Die Linien, welche die LAUE-Kegel mit dem Gitterkegel gemeinsam haben, geben an, wo die vervielfältigten Lampenbilder mit Spiegelung am Gitter bzw. bei Durchleuchtung des Gitters zu erwarten sind.*

An dieser Stelle versteht man, warum bei Kippung des Gitters die vervielfältigten Lampenbilder auf einer geschwungenen Linie zu sehen sind, die an einen Hyperbelast oder eine Parabel erinnert und die schließlich mit dem Beugungsbild der Spiegelung sich zu einer Kurve schließt, welche einer Ellipse gleicht. Vor dem Hintergrund der geometrischen Analyse kann man hinzufügen, dass die beiden Bedingungen für die optischen Wege, welche man zunächst am Beugungsversuch ohne Rotationen formuliert hat, sich auch hier als tragfähig erweisen und dass bei Drehwinkeln bis zu 45° das Beugungsbild in Form eines *Hyperbelastes* auftritt, bei exakt 45° in eine *Parabel* übergeht und bei Winkeln größer 45° zusammen mit dem Beugungsbild der Spiegelung zu einer *Ellipse* wird. Sorgfältige Messungen, bei denen man auf der Tafel die Form des Beugungsbildes festhält, bestätigen dies. Bei einem gekippten Gitter findet man die vervielfältigten Lampenansichten des Beugungsbildes auf dem ebenen Schirm in Form von Kegelschnitten. Diese sind aus Schnitten der Schirmebene mit dem Gitterkegel ableitbar. Bei einem Drehwinkel von 45° liegt die Schirmebene parallel zur senkrechten Mantellinie des Gitterkegels, entsprechend tritt genau dann die Parabel auf.

Während man das Gitter kippt, wandern die Lampenbilder einer bestimmten Ordnung auf dem senkrechten Schirm annähernd auf Geraden. Wählt man den Abstand zwischen Gitter und Tafel entsprechend, so kann man direkt verfolgen, wie die hellen Flecken die senkrechten Linien eines Tafelmusters überstreichen. Die

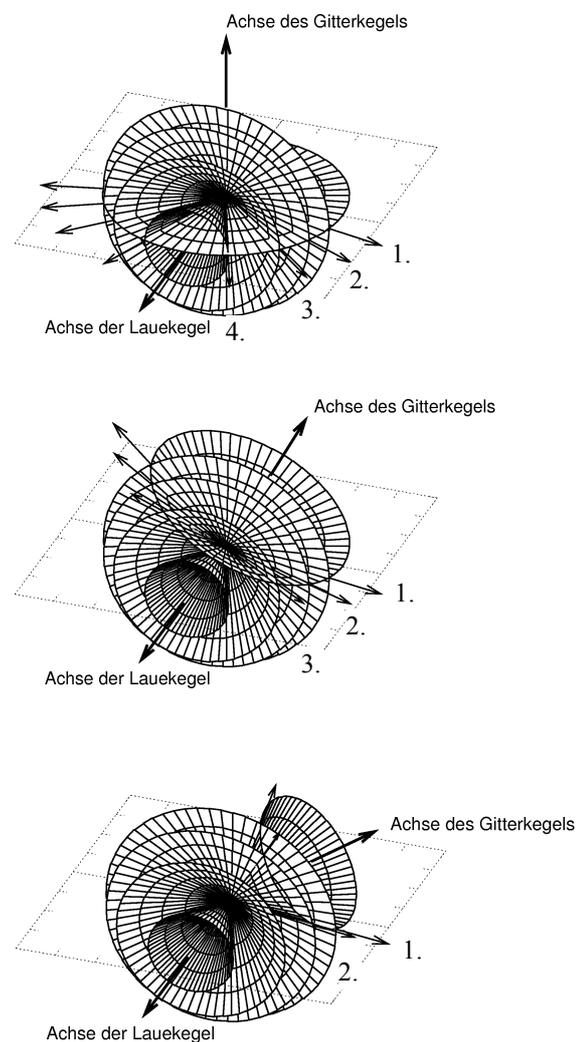


Abb. 26:

Schnitte des Gitterkegels mit den LAUE-Kegeln für drei verschiedene Stellungen des gekippten Gitters. Die Schnittgeraden geben die Richtungen der Beugungsmaxima an.

Richtungen dieser hellen Flecken werden während der ganzen Rotation durch die Mantellinien der entsprechenden LAUE-Kegel bestimmt. Aus diesen schneidet die Schirmebene Hyperbeläste heraus. Da der Öffnungswinkel der LAUE-Kegel bei vielen Gittern recht groß ist ($n \cdot \lambda \ll g$), wird die Krümmung der entsprechenden Hyperbeläste klein, d.h. die Hyperbeläste nähern sich Geraden an.

Kippt man nun ein Gitter, beginnend bei einem Kippwinkel von $\varphi = 0^\circ$ bis annähernd 90° , so schneidet zunächst der zur Horizontalebene entartete Gitterkegel aus allen gemäß $n \cdot \lambda < g$ möglichen LAUE-Kegeln die Richtungen für die verschiedenen Lampenbilder des Beugungsbildes heraus. Je weiter man das Gitter dreht, umso enger wird der Öffnungswinkel des Gitterkegels. Entsprechend hat der Gitterkegel mit immer weniger LAUE-Kegeln gemeinsame Mantellinien, bis es bei Rotationswinkeln von annähernd 90° nur noch einige LAUE-Kegel sind, mit denen sich gemeinsame Schnittlinien ergeben (*Abbildung 26*).

Die Verwandlungen des Beugungsbildes durch Kippen des Gitters lassen sich, wie oben im Einzelnen erläutert, Schritt für Schritt im Konzept optischer Wege beschreiben. Dabei kann man die Wanderung einzelner, bestimmter Beugungsordnungen mittels der 1. Bedingung an die optischen Wege darstellen, während die Form des gesamten Beugungsbildes aus der 2. Bedingung folgt. Je nach Lerngruppe mag man auf eine Behandlung des Zusammenspiels beider Bedingungen in Form gemeinsamer Mantellinien von Gitter- und LAUE-Kegeln verzichten und nur die Form des gesamten Beugungsbildes im Zusammenhang mit der 2. Bedingung thematisieren.

In Leistungskursen mit sehr begabten Schülerinnen und Schülern oder in den Anfangssemestern des Physikstudiums bietet es sich an dieser Stelle inhaltlich an, das Beugungsbild eines Gewebes auf dem Hintergrund der LAUE-Kegel wieder aufzugreifen: Da sich im Gewebe in zwei zueinander senkrechten Richtungen die Strukturen des einfachen Gitters überlagern, ergeben sich jetzt die möglichen Beugungsrichtungen durch zwei entsprechend zueinander senkrechten LAUE-Kegelscharen. Die Richtungen gemeinsamer Mantellinien weisen in Richtung der unterschiedlichen Beugungsordnungen.

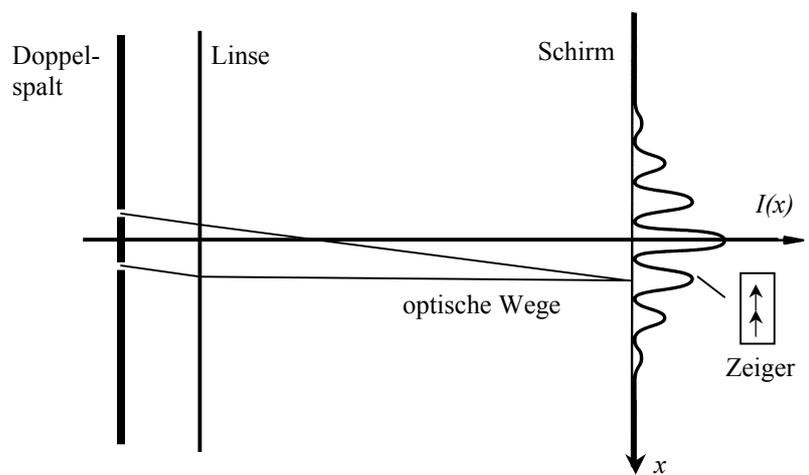
5.2 Zeigerformalismus und Übergang zur Quantentheorie

Mit dem Übergang von der Beugung zur Quantentheorie treten neue Inhalte hinzu, die es einzuführen gilt. Neben den statistisch zu beschreibenden Ergebnissen von Messprozessen sind es insbesondere die Wellenfunktionen Ψ_i . Ihre formale bzw. abstrakte Struktur wird in der Schule gerne – im Rückgriff auf FEYNMAN – in Form von Zeigern repräsentiert (FEYNMAN 2000). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Ansatz FEYNMANS aufgegriffen, wie auch die darauf aufbauenden Arbeiten von BADER (DORN 2000), ERB (ERB 1994) und WERNER (WERNER 2000) berücksichtigt werden. Die entsprechenden Darstellungen finden sich im zweiten Teil dieses Kapitels.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird hingegen ausgeführt, wie die Einführung der Zeiger selbst thematisch dem Übergang zur Quantentheorie vorangehen kann. Dabei wird als didaktischer Weg vorgeschlagen, die Zeiger zunächst am Doppelspalt zu thematisieren und dort zu entwickeln, inwiefern sie abstrakte Ordnungselemente ohne ontologischen Gehalt darstellen. Erst auf dieser Grundlage schließt sich der Übergang zur Quantentheorie an.

5.2.1 Einführung des Zeigerformalismus

Mit dem Übergang vom Gitter zum Doppelspalt treten in der Struktur des Beugungsbildes an die Stelle scharf kontrastierter, vielfältiger Lampenbilder ausgeprägte Helligkeitsunterschiede. In der Richtung, in welche sich das Beugungsbild erstreckt, nimmt der Kontrast der vervielfachten Lampenbilder ab. Es bietet sich daher am Doppelspalt an, die Helligkeitsübergänge durch den Intensitätsverlauf längs einer Ortskoordinate $I(x)$ darzustellen (Abb. 27).



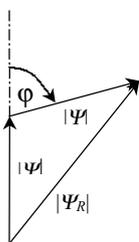
Bei der Behandlung des Intensitätsverlauf am Doppelspalt mit optischen Wegen und Zeigern.

Gitters im Kerncurriculum ist diese Darstellung nicht notwendig, weil die geometrische Analyse der abgelösten Versuche von Gittern hoher Strichzahl und kleiner Gitterkonstanten ausgeht. Ein entsprechender Intensitätsverlauf, der die vervielfachten Lampenbilder repräsentiert, fiel an den Grenzen des Lampenbildes steil ab und verlief ansonsten um Werte nahe null. Zugunsten einer stufenweisen Zunahme der Komplexität kann man also im Kerncurriculum auf eine Darstellung und Diskussion des Intensitätsverlaufes verzichten und an seine Stelle die diskrete Abstufung der vervielfältigten Lampenansichten treten lassen.

Experimentelle Grundlage für die Behandlung der Beugung am Doppelspalt bildet ein Versuch, bei dem ein Doppelspalt mit einem Laser durchleuchtet wird. An den Doppelspalt schließen sich eine Linse und - in deren Brennebene - ein Schirm an. Auf dem Schirm beobachtet man das Beugungsbild, bei dem auch mit bloßem Auge Übergänge zwischen hellen und dunklen Bereichen auszumachen sind. Zusätzlich misst man bzw. gibt man den Intensitätsverlauf $I(x)$ längs einer Ortskoordinate x an, die in Richtung des Beugungsbildes weist. Die Intensität verläuft proportional zum Quadrat der Kosinusfunktion (Abb. 27).

Der Zeigerformalismus wird nun in zwei Stufen eingeführt:

1. Der Verlauf proportional zum Quadrat der Kosinusfunktion wird rein geometrisch so dargestellt, dass der Anfang eines Zeigers um die Spitze eines zweiten, gleich langen Zeigers rotiert. Für den Übergang von einem Maximum zum benachbarten Maximum des Intensitätsverlaufes soll sich der Zeiger einmal um 360° drehen. Das Quadrat der Länge des durch Vektoraddition gebildeten resultierenden Zeigers ist dann proportional zum Quadrat der Kosinusfunktion. - Die beiden Zeiger sind auf dieser ersten Stufe der didaktischen Elementarisierung zwei Vektoren, die so verknüpft werden, dass man den Intensitätsverlauf beschreiben kann. Da sie mit geometrischen Mitteln Helligkeitsverläufe beschreiben,



$$|\psi_R|^2 = |\psi|^2 + |\psi|^2 - 2 |\psi| |\psi| \cos(180^\circ - \varphi)$$

$$|\psi_R|^2 = 2 |\psi|^2 (1 - \cos(180^\circ - \varphi))$$

$$|\psi_R|^2 = 2 |\psi|^2 (1 + \cos \varphi)$$

$$|\psi_R|^2 = 4 |\psi|^2 \cos^2(0,5 \varphi)$$

kommen sie in abstrakter Form zur Anwendung.

2. Jedem Ort des Schirms sind in Entsprechung der beiden Öffnungen des Doppelspaltes zwei opti-

Abb. 28:

Die Berechnung der Intensität geht aus der Vektoraddition zweier Zeiger des Betrages $|\psi|$, die sich um die Phase φ unterscheiden, hervor.

sche Wege zuzuordnen. Von Intensitätsmaximum zu Intensitätsmaximum unterscheiden sich die Weglängen der optischen Wege genau um die Basislänge λ . Ordnet man nun jedem optischen Weg in der Weise einen Zeiger zu, dass auf der Länge λ sich ein Zeiger um einen Winkel von 360° dreht, so kann man den unter 1. eingeführten abstrakten Beschreibungsansatz mit dem Konzept optischer Wege verbinden und zusätzlich Intensitätsverläufe in die Beschreibung integrieren. Am Ort des Schirmes müssen die entsprechenden Zeigerstellungen ermittelt und vektoriell addiert werden. Das Betragsquadrat des resultierenden Vektors ist proportional zur Intensität am Ort des Schirms (*Abb. 28*). Insbesondere zeigen an den Orten der Maxima die den entsprechenden optischen Wegen zugeordneten Zeiger in eine Richtung; hier ergibt die Vektoraddition den resultierenden Vektor größter Länge bzw. größten Betrages (*Abb. 27*).

Die weitere Behandlung der Beugung im Zeigerformalismus, insbesondere die Beugung am Einzelspalt und das Zusammenspiel von Spalt- und Gitterbeugung, ist in den letzten Jahren vielfältig ausgearbeitet worden und soll hier nicht wiederholt werden (BADER 1996, DORN 2000, ERB 1994, WERNER 2000). Das Curriculum kann auf die entsprechenden Unterrichtsvorschläge unmittelbar zurückgreifen, wird aber an Stelle des Wellenstrahles (DORN 2000) bzw. des Lichtweges (ERB 1994) den Begriff des optischen Weges beibehalten.

Mit der Einführung der Zeiger am Doppelspalt unterscheidet sich die Art, wie Ordnungselemente angewendet werden, deutlich von dem Ansatz des Kerncurriculums. Dort beziehen die optischen Wege als geometrische Ordnungselemente rein geometrisch zu beschreibende Bedingungen auf die räumliche, also auch geometrisch darzustellende Konfiguration des Beugungsbildes. Bedingungs-zusammenhang, Erscheinungskonfiguration und Ordnungselement sind gleicher Natur. Am Doppelspalt werden mittels der optischen Wegen zugeordneten Zeiger Helligkeitsübergänge bzw. Intensitätsverläufe dargestellt. Damit ist das Ordnungselement „Zeiger“ nicht mehr gleicher Natur wie der durch Bedingung und Erscheinung festgelegte Kontext. Es ist aber auch kein Modell im Sinne eines Vorstellungskomplexes, der zur ursächlichen Erklärung eines Phänomens herangezogen wird. Vielmehr wird hier die Anwendung des Ordnungselementes abstrakt, es bekommt Symbolcharakter. Dieser Symbolcharakter bietet dann - im Rückgriff auf die Ideen FEYNMANS – die Möglichkeit, die Brücke zur Quantentheorie sehr elegant zu schlagen (FEYNMAN 2000).

Im Rahmen des hier aufgezeigten curricularen Weges von der Beugung am Gitter über die Beugung am Doppelspalt hin zur Quantentheorie kommt dem Doppelspalt also eine zentrale Rolle zu. Nicht nur, da an ihm die Zeiger eingeführt werden können, sondern auch, weil durch den Kontrast zu der phänomenologischen Vorgehensweise am Gitter jetzt der Übergang zu abstrakten Ordnungselementen und abstrakten Beschreibungsansätzen deutlich aufgezeigt und methodisch thematisiert werden kann. Das abstrakte Ordnungselement „Zeiger“ steht nicht mehr, wie bei einer phänomenologischen Vorgehensweise angestrebt, *innerhalb* des durch Bedingung und Erscheinung festgelegten Kontextes, sondern wird auf formale Weise zur Beschreibung der Erscheinung eingeführt. Der Kontrast zwischen der phänomenologischen Vorgehensweise im Kerncurriculum und der Einführung der Zeiger am Doppelspalt wird im Rahmen der didaktischen Elementarisierung als ein Mittel verwendet, mit dem man ein hohes Methodenbewusstsein evozieren kann.

Der methodischen Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch ein weiterer Gesichtspunkt dafür angefügt, die Beugung zunächst am Gitter und erst dann am Doppelspalt zu behandeln: Das Kerncurriculum thematisiert die Beugung gemäß dem in dieser Arbeit entfalteten phänomenologischen Ansatz. Im Sinne dieses Ansatzes ist es konsequent, von einer besonders reinen Erscheinung des Phänomens auszugehen, und diese tritt, wie die Erscheinungsreihen zur Beugung im Rahmen der Freihandversuche zeigen (Kapitel 4.1), bei der Beugung am Gitter auf.

Mit dem Übergang zum Doppelspalt wird die phänomenologische Vorgehensweise zu Gunsten einer abstrakten Beschreibung verlassen, sie dient aber weiter als Referenz im Rahmen einer Methodendiskussion. Behielte man die rein phänomenologische Vorgehensweise bei, müsste man die mit dem Übergang vom Gitter zum Doppelspalt auftretenden Helligkeitsübergänge bzw. Kontrastreduktion der vervielfachten Lampenbilder so untersuchen, dass man durch Variation der Gitterkonfigurationen die entsprechenden Abwandlungen der Kontraste verfolgte (Ansatzpunkte hierzu finden sich bei MAIER 1981 und 1984). Dafür wären die experimentellen Herausforderungen immens, ginge man auf eine saubere Vergleichbarkeit der Kontraste zu. - Dass es im Rahmen dieses Curriculums jedoch nicht angestrebt werden soll, die Beugung umfassend oder gar vollständig phänomenologisch zu erschließen, ist bereits dargestellt worden.

5.2.2 Übergang zu holistischen Eigenschaften der Quantentheorie

Für den Übergang zu den holistischen Eigenschaften der Quantentheorie ist es im Rahmen des hier aufgezeigten Weges über die Einführung der Zeiger am Doppelspalt möglich, zunächst dort auch die quantenhafte Wechselwirkung von Licht und Materie zu behandeln. Diese Möglichkeit soll hier ausgeführt werden. Selbstverständlich bieten sich eine Fülle weiterer Wege ebenfalls an. Je nach curricularen Rahmenbedingungen kann man beispielsweise Elementen des Unterrichtskonzeptes zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells von WERNER (WERNER 2000) und den Vorschlägen von BADER bzw. KÜBLBECK folgen (DORN 2000, KÜBLBECK 2002).

Die Schülerinnen und Schüler, welche eine phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege kennengelernt haben, so wie es in dieser Arbeit vorgestellt wird, haben bis dahin die Erklärungen ohne den Rückgriff auf ein Lichtmodell formuliert. Damit liegt es nahe, nicht von einer quantenhaften Wechselwirkung von Licht und Materie zu sprechen, sondern vielmehr darzustellen, dass mit Reduktion der Beleuchtungsstärke bei einem Beugungsexperiment am Doppelspalt schließlich einzelne Beleuchtungsereignisse festzustellen sind, die lokal und energetisch diskret auftreten. Im Mittel über eine große Anzahl von Leuchtereignissen ergibt sich der in *Abbildung 27* dargestellte Intensitätsverlauf. Das einzelne Ereignis tritt vollkommen zufällig an dieser oder jener Stelle auf, der Intensitätsverlauf als Mittel über eine große Anzahl von Ereignissen ist aber sehr wohl bestimmt. Damit kann dem einzelnen Ereignis eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden, es ist aber nicht determiniert. Die Wahrscheinlichkeit für ein Leuchtereignis an einer bestimmten Stelle des Schirmes geht auf die Intensität und damit auf das Betragsquadrat des resultierenden Zeigers zurück.

Ob man das soeben beschriebene Zusammenwirken einzelner Leuchtereignisse über das Abfotografieren von Beugungsbildern mit unterschiedlichen Belichtungszeiten plausibel macht, indem man die Körnigkeit des Filmes ausnutzt (WERNER 2000), oder ob man das Experiment nur darstellt, ist im Einzelfall abzuwägen.

Durch den Verlauf des Experimentes muss also festgehalten werden, dass auch im Fall einzelner Leuchtprozesse die *kontextuale Abbildung* des Doppelspaltes bzw. des Gitters auf das Beugungsbild erhalten bleibt. Damit ist weiterhin die Struktur des Doppelspaltes, des Gitters oder auch des einzelnen Spaltes *als Ganzes* wirksam. Der einzelne Leuchtprozess muss zu-

sammen mit der beugenden Struktur gedacht werden; er schafft den Zusammenhang zwischen dem Leuchten der Lampe und dem Hellwerden am Ort des Schirms gemäß den räumlichen Bedingungen im Zwischenraum. Gibt man dem quantenhaften Prozess zwischen dem Leuchten der Lampe und der Erhellung des Schirmes den Namen Photon, so dürfen einen das lokale Auftreten von Leuchtereignissen am Ort des Schirms oder die diskreten Energien jedoch nicht dazu veranlassen, das Photon selbst rein als Teilchen zu denken. Auf diese Weise gedacht bliebe unerklärbar, warum die Struktur des Gitters als Ganzes wirksam werden sollte. - Vielmehr muss der räumliche Versuchsaufbau als bedingend dafür angesehen werden, wie die quantenhaft auftretende Leuchtprozesse den Zusammenhang zwischen dem Leuchten der Lampe und der Erhellung des Schirms herstellen. Die Photonen sind Quantenobjekte; sie dürfen nicht als sich selbst genügendes Gebilde gedacht werden, das unabhängig von den Versuchsbedingungen an sich existieren sollte.

Versucht man, angeregt durch die ausgesprochen attraktive Vorstellung, das Photon sei vielleicht doch als Teilchen zu denken, den Leuchtprozess im Zusammenhang mit einzelnen Öffnungen des Doppelspaltes zumindest indirekt zu registrieren und damit nachträglich doch die Vorstellung eines sich isoliert bewegenden, klassischen Teilchens zu rechtfertigen, welches den Spalt durch die eine oder andere Öffnung passiert (ENGLERT 1992), macht man durch den experimentellen Eingriff den Doppelspalt zu zwei einfachen, isolierten Spalten. Diese stellen gerade keine Gesamtheit mehr dar, sondern werden als zwei einzelne, zu unterscheidende Strukturen präpariert. Entsprechend beobachtet man dann nicht mehr das Beugungsbild des Doppelspaltes, sondern das des Einzelspaltes. So zieht sich die Gesamtheit, als welche sich von Anfang an die durchleuchteten Strukturen im Rahmen der Beugung gezeigt haben, bis hin zu quantenhaft auftretenden Leuchtvorgängen durch. Gerade dort zeigt sich im Einzelnen, wie Gesamtheiten wirksam sind. Das löst den Objektbegriff der klassischen Physik auf.

Schon die sprachliche Bezeichnung „Welcher-Weg-Experiment“ suggeriert zwar, das Photon bewege sich als isoliertes Objekt durch diese oder jene Öffnung des Doppelspaltes oder Gitters; die Ergebnisse der Experimente fordern aber, die sprachliche Eindeutigkeit hin zu einer begrifflichen Erfassung von wirksamen Gesamtheiten weiterzuentwickeln. Die Quantenobjekte sind ohne die wirksamen experimentellen Bedingungen nicht zu fassen. Das muss im Unterricht festgehalten werden, beispielsweise in einer Graphik gemäß *Abbildung 29*.

Ist der Begriff des Photons für die Schülerinnen und Schüler im Sinne eines Quantenobjektes durch gründliche Besprechung klar geworden, kann man unter dem historischen Aspekt noch die Vorstellungen klassischer Modelle in diesem Zusammenhang anschließen, aber auch sprachliche Besonderheiten, wie den Ausspruch DIRACS, ein Photon interferiere mit sich selbst, behandeln. Eine weitere Behandlung der Quantentheorie, so wie sie beispielsweise von BADER, KÜBLBECK und MÜLLER ausgearbeitet worden ist, mag folgen (DORN 2000, KÜBLBECK 2002).

Im Rahmen dieses Moduls kann man außerdem, wenn es durch die Vorbildung der Lerngruppe nicht unnötig ist, den Nutzen und die Leistungsfähigkeit von Modellen exemplarisch behandeln: Während durch die Thematisierung der Welcher-Weg-Experimente für Lichtmodelle, die auf klassisch vorgestellte Lichtteilchen rekurrieren, deren sinnvoller Rahmen sich schon fast von selbst erklärt, ergeben sich die Verbindungen zum Wellenmodell aus dem Zeigerformalismus und den optischen Wegen. Die Länge des Zeigers ist der Wellenamplitude anzupassen. In Ausbreitungsrichtung der Welle muss man die Zeiger einzelnen Punkten phasenverschoben zuordnen (DORN 1983). So kann man über das Wellenmodell die Wirksamkeit der räumlichen Bedingungen erfassen, während ein Teilchenmodell die Leuchtprozesse elegant repräsentiert.

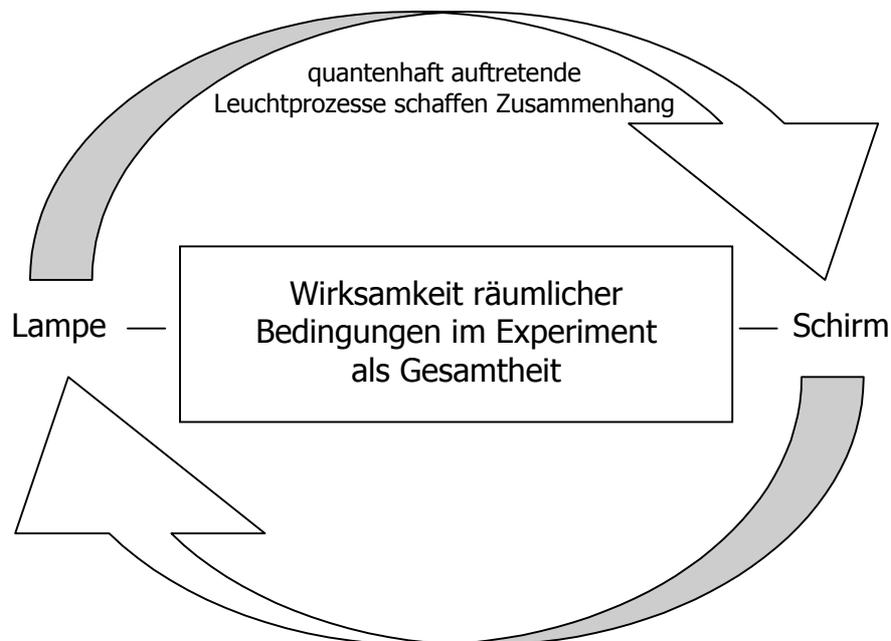


Abb. 29:

Zusammenfassung der Beugung unter Berücksichtigung der Welcher-Weg-Experimente.

Die Verbindung von Beugung und Quantentheorie, so wie sie in diesem Erweiterungsmodul zum Kerncurriculum entwickelt wird, stellt die als Gesamtheiten wirksamen Bedingungen besonders heraus. Dadurch setzt das Curriculum dahingehend einen Schwerpunkt, dass die Quantentheorie zunächst über die Verbindung zu schon Bekanntem und nicht über den Kontrast zu klassischen Vorstellungen eingeführt wird. Die Quantentheorie mag so den Schülerinnen und Schülern als ein Teilgebiet der Physik begegnen, welches, trotz vieler neuer Denksätze, mit den zuvor behandelten Inhalten in Verbindung steht. Die Physik kann als etwas erlebt werden, das durch die Mächtigkeit seiner Zusammenhänge fasziniert und Interesse bündelt. Gleichzeitig wird die Quantentheorie von Anfang an als eine „Theorie der Beziehungen“ thematisiert (GÖRNITZ 1999). In diesen Möglichkeiten werden zentrale Argumente gesehen, die Beugung in der Schule phänomenologisch zu behandeln. Es ist oben ausgeführt worden, dass man so eine Tragfähigkeit des Methodenbewusstseins erreichen kann.

5.2.3 Diskussion des Übergangs zur Quantentheorie

Im Rahmen der didaktischen Elementarisierung, wie sie im vorangehenden Kapitel vorgestellt wird, treten für den Übergang zur Quantentheorie drei Stufen auf:

1. Es werden quantenhafte Leuchtprozesse beschrieben, ohne dass man ein Teilchenbild zu Grunde legt. Im Zentrum der Beschreibung steht, dass der quantenhaft auftretende Prozess den Zusammenhang zwischen dem Leuchten der Lampe und der Erhellung des Schirms herstellt.
2. Für das einzelne unter 1. beschriebene Leuchtereignis sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. In Entsprechung des Intensitätsverlaufes kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angegeben werden.
3. Die räumliche Konfiguration des Versuchsaufbaus zwischen Lampe und Schirm bestimmt als Ganzes weiterhin den Intensitätsverlauf bzw. die Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Bei der ersten der drei Stufen trifft man keinerlei Aussage über das Licht, vielmehr charakterisiert man den Zusammenhang zwischen dem Leuchten der Lampe und der Erhellung des Schirms. Dieses Vorgehen geht in letzter Konsequenz auf den phänomenologischen Ansatz MACKENSENS, MAIERS und OHLENDORFS zurück, wie er schon in Kapitel 3.1.1 referiert worden ist. Alle Drei entwickeln die Photometrie aus dem Sehen heraus und bringen die Erhel-

lung an einem Ort mit dem in Verbindung, was eine Beobachterin oder ein Beobachter von diesem Ort aus sehen. Damit müssen sie keinerlei Aussage über das Licht treffen. Da das Konzept optischer Wege nur das räumliche Bedingungsgefüge beschreibt, kann es bis zu dieser Stelle auch die Frage nach der Natur des Lichtes offen lassen und muss ebenfalls auf kein Lichtmodell Bezug nehmen. Es genügt der phänomenologische Ansatz, von der konstatierten Erhellung in einer angetroffenen räumlichen Konfiguration auszugehen. Das bringt im Übergang zur Quantentheorie den Vorteil mit sich, dass man von Anfang an die quantenhaften Leuchtprozesse und später die Lichtquanten oder Photonen im Kontext ihres Auftretens einführen kann. Man muss sie nicht mit klassischen Vorstellungen belegen. Damit wird die Gesamtheit der wirksamen Bedingungen als solche besonders klar dargestellt.

Mit dem Übergang zu Welcher-Weg-Experimenten nimmt man implizit auf eine Teilchenvorstellung Bezug, die man mit dem Begriff des Lichtquants oder Photons korreliert, oder man führt experimentell ein Merkmal ein, mit dem es möglich wird, Leuchtereignisse mit räumlichen Bahnen bzw. optischen Wegen zu korrelieren⁸. Damit macht die Vorstellung des Photons als Teilchen nur im Zusammenhang mit einem entsprechenden experimentellen Aufbau einen Sinn. - Am Anfang steht also die Lokalisierung, welche das Experiment vorgibt, daraus resultiert ein Ergebnis, bei dem man sich das Photon stärker als Teilchen vorstellen kann. In dem vorgeschlagenen Weg wird nicht das „Teilchen Photon“ zum „Quantenobjekt Photon“ erweitert, sondern aus dem „Quantenobjekt Photon“ das klassische „Teilchen Photon“ als ein möglicher Aspekt abgeleitet. Dies ist möglich, weil von Anfang an für die Beugung herausgearbeitet wird, wo Gesamtheiten als räumliches Bedingungsgefüge wirksam sind.

Der phänomenologische Ansatz, der durchgängig ordnet, was in geordneten Mess- und Beobachtungshandlungen als zeitliche und räumliche Abfolge sich gegenseitig bedingender Erscheinungen tätig erzeugt wird, baut so eine Brücke zur Quantentheorie nicht nur in methodischer, sondern auch in inhaltlicher Hinsicht, treten doch von vornherein Gesamtheiten als Bedingungsgefüge auf. Es steht von Anfang an ein holistischer Ansatz im Vordergrund.

Im Wellenmodell schafft man diese Gesamtheit nicht durch den methodischen Ansatz, sondern vielmehr durch den Inhalt der Modellvorstellung, hier in Form des wellenförmig sich

⁸ Dieser Schritt kann entweder mitgeteilt werden oder man greift ein Experiment von KÜBLBECK und MÜLLER auf, bei dem ein Doppelspalt mit Polarisatoren zum Einsatz kommt (KÜBLBECK 2002, S. 144). Dieses Experiment mag man in diesem Zusammenhang vielleicht nicht in allen Aspekten besprechen, sondern vielmehr darauf hinweisen, dass man die Gesamtheit der durchleuchteten Struktur durch einen experimentellen Eingriff auflöst.

ausbreitenden Lichtstromes. Diese Modellvorstellung bringt die einzelnen Gitteröffnungen in einen gemeinsamen Kontext. Ohne diese Modellvorstellung wird von Anfang an deutlich, dass der Zusammenhang innerhalb einer experimentellen Anordnung mehr umfasst, als dieses Modell leisten kann, und dass der Zusammenhang insbesondere nicht vollständig durch den Inhalt der Modellvorstellung repräsentiert ist. -

Ist die Quantentheorie in einigen Aspekten im Unterricht besprochen worden, so können sich die Schülerinnen und Schüler im Rückblick auf die Unterrichtsreihe verdeutlichen: Ein Gitter und ein einzelner Spalt haben unterschiedliche Beugungsbilder. Würde man sich das Gitter additiv aus einzelnen Spalten aufgebaut denken, so dürfte sich das Beugungsbild nicht verändern, sondern müsste lediglich mit der Hinzunahme weiterer Spalte die periodische Anordnung zum Gitter heller werden, sind doch Beugungsbilder invariant unter Translationen. Die einzelnen Öffnungen des Gitters erweisen sich aber als untereinander gleichwertig und bilden eine Gesamtheit. Diese Gesamtheit bestimmt das Beugungsbild, welches vom Beugungsbild des Spaltes verschieden ist. Würde man die Gleichwertigkeit oder Ununterscheidbarkeit durch experimentelle Eingriffe aufheben, würde sich auch das Beugungsbild des Gitters zum Beugungsbild des Spaltes verändern. - Mit der Behandlung der Quantentheorie vertieft und modifiziert man also, wie dieser Rückblick exemplarisch zeigt, auch die Wissensbasis zur Beugung. Beide Themen werden noch stärker vertikal vernetzt.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch angefügt, dass man zur Quantentheorie auch im Anschluss an das Kerncurriculum zur Beugung übergehen kann, ohne den Zeigerformalismus einzuführen. Die oben genannten Stufen der didaktischen Elementarisierung bleiben weiterhin möglich. An die Stelle eines Intensitätsverlaufes mit weichen Übergängen tritt dann ein Verlauf mit scharfen Stufen, an die Stelle der kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsverteilung eine endliche Anzahl möglicher Ereignisse und die ihnen zugeordneten Wahrscheinlichkeiten. Gerade in Grundkursen, in denen weniger Vertiefungsthemen möglich sind, können so die Schülerinnen und Schüler zentrale Elemente der Quantentheorie kennen lernen, ohne sich mit dem Zeigerformalismus auseinandersetzen zu müssen.

5.2.4 Ausblick auf die Atomphysik

Als kurzer Ausblick soll hier noch zum Abschluss des Kapitels *Zeigerformalismus und Übergang zur Quantentheorie* umrissen werden, wie man, nachdem man die Beugung im Konzept optischer Wege behandelt und den Übergang zur Quantentheorie thematisiert hat, auf die Atomphysik eingehen mag.

Mit der Bestrahlung von Kristallen mit Röntgenstrahlung treten Beugungsbilder auf. Ermittelt man durch den streifenden Einfall (ca. 1°) auf ein Strichgitter die Basislänge der Röntgenstrahlung (HAKEN 1987, S. 18), so kann man über die Beugungsbilder die Gitterkonstante einer dem Kristall immanenten periodischen Struktur angeben. Bringt man diese Struktur mit der Teilchenvorstellung für Atome, die man in anderen Experimenten gewinnen kann, zusammen, so sind Atome oder Moleküle im Sinne dieses Experimentes klar zu lokalisierende Strukturen.

Lässt man hingegen aus einem Ofen Atome oder Moleküle durch ein (Gold-)Gitter gehen, erhält man, bei geeigneter Präparation, dahinter ein Beugungsmuster (ARNDT 2004). Die Atome oder Moleküle sind in gleicher Art Quantenobjekte wie schon die Photonen. Sie stellen einen Zusammenhang her, der nicht lokal zu beschreiben ist. Sobald aber man über Leuchtereignisse prinzipiell einen Rückschluss über eine Bahn der Atome oder Moleküle ziehen könnte, verschwindet das Beugungsmuster des Gitters. - Atomen und Molekülen dürfen auch nur auf dem Hintergrund genau anzugebender experimenteller Vorgaben bestimmte Eigenschaften zugeordnet werden. Der Begriff des Atoms oder Moleküls fasst experimentelle Bedingungen und die daraufhin aufgetretene Erscheinung in gleicher Weise zusammen. Er umschließt mehr, als eine einfache Teilchenvorstellung anzugeben vermag.

5.3 Ausblick auf die Interferometrie und Holographie

5.3.1 Das MICHELSON-Interferometer

Wenn die Spiegelerscheinungen nach dem Curriculum von MACKENSEN und OHLENDORF (Kapitel 3.1.2) und die Beugung im Konzept optischer Wege in einer Lerngruppe unterrichtet werden, dann stellt das MICHELSON-Interferometer eine interessante Anwendungsaufgabe dar,

die sich die Schülerinnen und Schüler weitgehend selbständig erarbeiten können. Gleichzeitig vertiefen sie dabei ihr Wissen zur Optik.

An den Ort des Lasers wird bei einem MICHELSON-Interferometer zunächst eine Kerze gestellt. Vom Schirm aus blickt man in Richtung des halbdurchlässigen Spiegels und beobachtet die sich ergebenden Ansichten. Dabei stehen die Spiegel S_1 und S_2 in deutlich unterschiedlichen Abständen x_1 und x_2 vom halbdurchlässigen Spiegel entfernt (*Abbildung 30*).

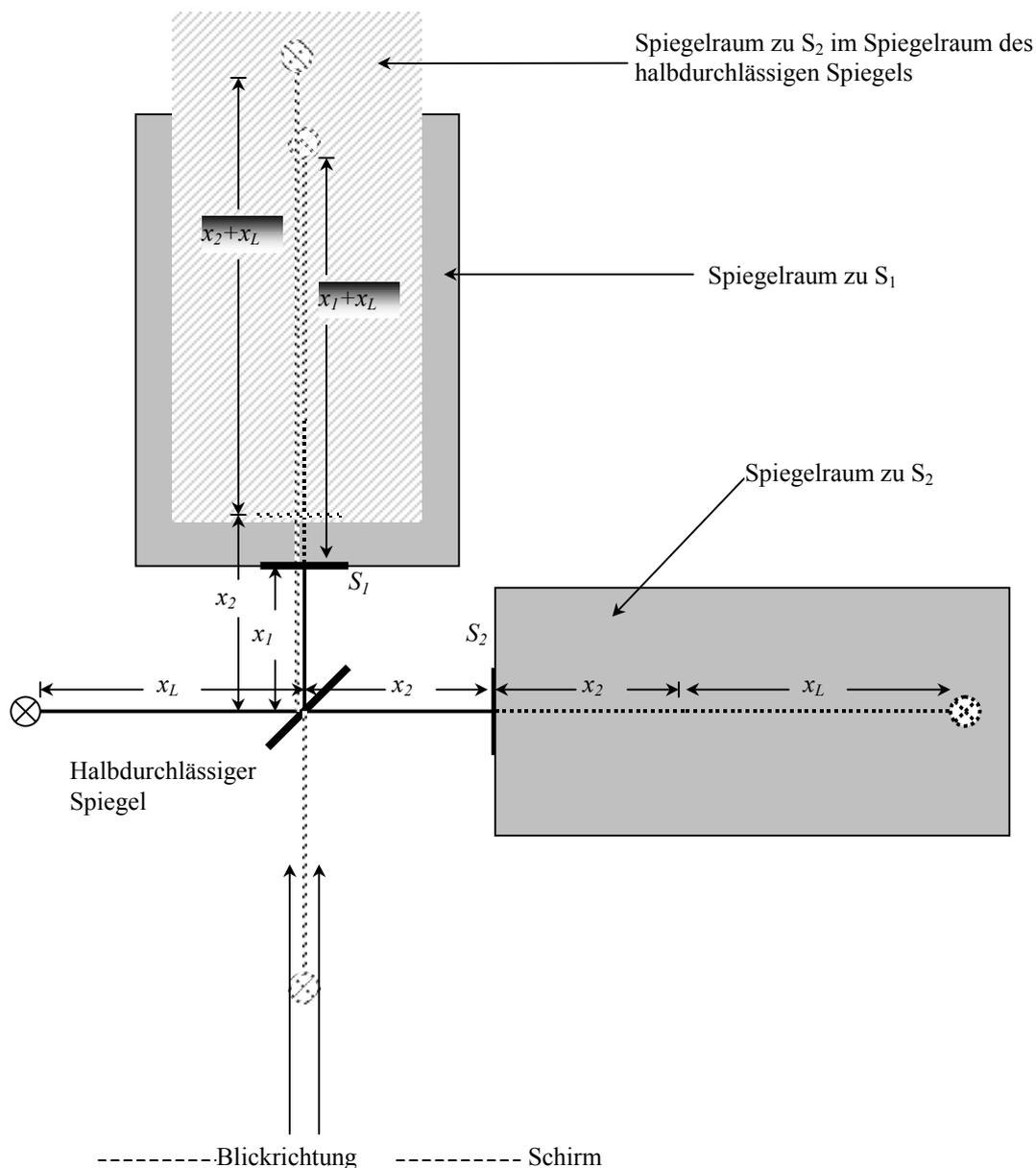


Abb. 30:

Aufbau des MICHELSON-Interferometers einschließlich der Spiegelräume.

Der halbdurchlässige Spiegel öffnet zum einen die Sicht in einen Spiegelraum, in welchem sich der Spiegel S_2 samt dem durch ihn konstituierten Spiegelraum (Spiegelraum zu S_2) befindet. Zum anderen ist er Fenster für den Blick auf S_1 . In dem durch S_1 konstituierten Spiegelraum befindet sich der Spiegelraum des halbdurchlässigen Spiegels und dadurch auch die dort lokalisierte Kerze.

Der Blick wendet sich also einem Ensemble von Spiegelräumen zu. In Blickrichtung sehen eine Beobachterin oder ein Beobachter zwei Kerzen, die unterschiedlich weit von ihnen entfernt sind. Die unterschiedlichen Entfernungen können sie parallaktisch durch leichte Bewegungen des Kopfes bestätigen.

Man hat so zunächst den Eindruck, in Blickrichtung auf zwei hintereinander aufgestellte Kerzen zu schauen. Allerdings tritt eine Besonderheit auf: Während eine Kerzenflamme normalerweise, außer in einem nahe dem Docht gelegenen durchsichtigen Bereich, undurchsichtig ist, nimmt man jetzt „durch die vordere Kerze hindurch“ die hintere Kerze wahr. - Es findet jetzt keine Resonanzfluoreszenz bzw. Absorption statt, die bei dort brennenden Kerzen die Durchsicht verhindern würde. Der halbdurchlässige Spiegel und die Spiegel S_1 und S_2 schaffen mittels des Spiegelgesetzes genau anzugebende Spiegelräume, die dort zu beobachtenden brennenden Kerzen gehen aber auf den durch Stoffumsatz ausgezeichneten Leuchtvorgang einer einzelnen Kerze zurück, die im Abstand x_L vor dem halbdurchlässigen Spiegel steht.

Ersetzt man die Kerze durch einen Laser, weitet dessen Strahl entsprechend auf und wählt die Abstände x_1 und x_2 annähernd gleich, so beobachtet man auf dem Schirm ein Muster heller und dunkler Streifen. Verschiebt man einen der Spiegel S_1 und S_2 sehr langsam mittels eines Feintriebes und vermeidet man Vibrationen des optischen Aufbaus, so wandern die Streifen mit dem Verschieben des Spiegels. Wenn man mittels einer Linse den Laser zusätzlich auf den Schirm abbildet, so wechseln sich - im Idealfall - helle und fast dunkle Flecken auf dem Schirm ab.

Eine Analyse im Konzept optischer Wege und der Vergleich mit der Beugung am Gitter ergeben, dass wieder *ein* Leuchtvorgang für die Ausleuchtung des ganzen Aufbaus wesentlich ist. Allerdings wird über die Spiegel der eine Leuchtvorgang an mehreren, verschiedenen Orten innerhalb des Aufbaus gesehen. Die gesehenen Leuchtvorgänge sind aber gleichartig. Sie befinden sich minimal auseinander gelegen und können auch, bei entsprechender Spiegelstellung, ganz übereinander liegen. In diesem Fall sind die entsprechenden optischen Wege gleich

lang. Mit dem Verschieben des entsprechenden Spiegels unterscheiden sich die optischen Weglängen - und das Hell-Dunkel-Muster tritt auf. Sorgfältige Messungen bestätigen, dass auch hier immer ein heller Fleck dann vorliegt, wenn die zugehörigen optischen Wege sich um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden.

An die Stelle der Struktur in den Beugungsexperimenten des Kerncurriculums, die als Ganzes von den Leuchtvorgängen an den verschiedenen Flecken der Lampe durchleuchtet wird, treten jetzt zwei Lampen des Spiegelraumes, die auf den gleichen Leuchtvorgang zurückgehen und gleichsam eine Struktur im Ensemble der Spiegelräume bilden, die sonst ein Doppelspalt im Beugungsexperiment bilden würde. - Die wesentlichen Kennzeichen oder das Bedingungsgefüge beider Versuchen kann man unmittelbar vergleichen. Beide Versuche zeigen sich in einem gemeinsamen Rahmen. Die Schülerinnen und Schüler erleben das Konzept optischer Wege und die Konstruktion der Spiegelräume auch in der Interferometrie als tragfähigen Ansatz.

5.3.2 Ausblick auf die Holographie

Indem man die Beugung im Konzept optischer Wege untersucht, entsteht auf dem Hintergrund jahrzehntelanger Forschungsarbeiten zur Wellenoptik nicht nur die Frage, wie sich in diesem Konzept die Interferometrie darstelle, sondern auch, ob sich die Holographie in dieses Konzept integrieren lasse. Es würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen, sollte diese Frage untersucht und dargestellt werden. Trotzdem mögen in Form eines Ausblicks hier

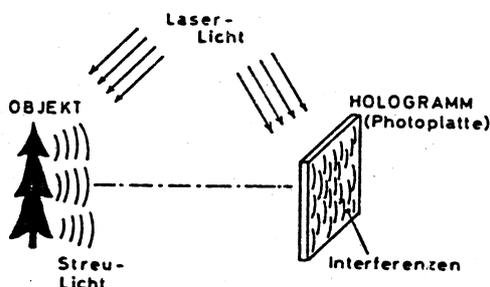


Abb. 31:

Versuchsaufbau zur Holographie nach KOPPELMANN (KOPPELMANN 1983).

noch einige Aspekte genannt sein, die künftige Arbeitsansätze bilden könnten.

In der Sprache der Wellenoptik überlagern sich auf dem Hologramm eine Referenzwelle mit einer am Objekt gestreuten Welle. Beide Wellenzüge sind kohärent. Entsprechend dieser Überlagerung werden die verschiedenen Körner eines Filmes unterschiedlich geschwärzt. Nach dessen Entwicklung liegt eine Struktur vor, deren Beugungsbild ein Bild des Objektes darstellt. - Unter anderen haben

NACHTIGALL und SIEMSEN einerseits und KOPPELMANN andererseits mehrere didaktische Wege aufgezeigt, wie dieser Zusammenhang vergleichsweise einfach in der Schule oder auch in der Lehrerbildung entfaltet werden kann (NACHTIGALL 1990, S. 255; KOPPELMANN 1983). Im Vergleich zu den im Kerncurriculum zur Beugung dargestellten Zusammenhängen fällt zunächst auf, dass auch bei Experimenten zur Holographie die Beleuchtung des gesamten Ensembles des Versuchsaufbaus auf die einzelnen Leuchtprozesse einer Lampe zurückgeht. Allerdings wird jetzt nicht, wie bei der Beugung, eine Struktur als Ganzes durchleuchtet, sondern vielmehr trifft die Helligkeit einer als Ganzes beleuchteten oder durchleuchteten Struktur mit der direkten Beleuchtung zusammen (*Abbildung 31*).

NACHTIGALL, SIEMSEN und KOPPELMANN schlagen nun vor, den Einfluss der beleuchteten Struktur in einem ersten, einfachen Fall durch einen einzelnen, hellen Punkt zu beschreiben (NACHTIGALL 1990, S. 259; KOPPELMANN 1983). Die Beleuchtung eines Lasers und die Beleuchtung durch einen einzelnen hellen Punkt wirken so am Ort des Hologramms zusammen. - Dieser Ansatz kann im Rekurs auf das Kerncurriculum aufgegriffen werden. Der dort in Kapitel 4.4.2 vorgestellte Versuchsaufbau für den Zusammenhang von Beugungs- und Abbild (*Abbildung 19*) entspricht in einer etwas modifizierten Weise dem von KOPPELMANN gewählten Aufbau: Am Ort des Beugungsbildes finden sich, sofern ein Gitter als Beugungsmuster dient, eine Reihe äquidistanter heller Flecken. Diese sind vervielfältigte Abbilder des zur Beleuchtung dienenden Lasers. Blendet man nun bis auf zwei dieser hellen Flecken alle weiteren aus, so mag man den einen hellen Fleck (beispielsweise die 1. Ordnung) als den einzelnen hellen Punkt des Holographie-Experimentes betrachten, den anderen Fleck (beispielsweise die 0. Ordnung) als die außerdem stattfindende Beleuchtung durch den Laser. Die sich auf dem Schirm in Position 2 ergebende Struktur stellt dann das Muster dar, welches sich auf einem entsprechenden Hologramm ergäbe. Es ist in dem hier beschriebenen Versuch ein Gitter, dessen Übergänge nicht allzu kontrastreich auftreten (*Abbildung 20*, Kapitel 4.4.2).

Photographierte man dieses Gitter ab, erhielte man als komplementäres Muster wieder ein Gitter. Dieses könnte man gegen das ursprüngliche Gitter des Versuches austauschen und dessen Beugungsbild beobachten. Es ergäbe sich dann in der 1. Ordnung der helle Punkt, von dem man in Entsprechung des Objektes ausgegangen war. Die 0. Ordnung hingegen müsste als optische Abbildung des Lasers interpretiert werden, der das „Hologramm“ durchleuchtet.

Der Versuchsaufbau für den Zusammenhang von Beugungs- und Abbild wird in dem hier vorgeschlagenen Weg also zum Verständnis der Holographie eingesetzt.

Bei diesem Aufbau unterscheiden sich nicht nur die optischen Wege zwischen benachbarten Gitteröffnungen und entsprechenden hellen Flecken im Beugungsbild um $\delta_n = n \cdot \lambda$, sondern auch zwischen den hellen Flecken des Beugungsbildes und den hellen Streifen des abgebildeten Gitters müssen sich die Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden. Nur so kann man der außerdem vorliegenden Bedingung gleich langer optischer Wege zwischen Gegenstand und Abbild genügen⁹. In Übertragung auf das „Hologramm“ heißt das: Am Ort des Hologramms wirken viele Beleuchtungen, die letztlich auf den Leuchtprozess einer Lampe zurückgehen, zusammen (Kohärenzbedingung). Insbesondere bildet dabei die direkte Beleuchtung eine Referenz für die Beleuchtung durch einzelne Objektpunkte. Auch hier ergibt sich überall dort Erhellung, wo sich die entsprechenden optischen Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden. Da als Referenz die direkte Beleuchtung hinzutritt, werden im Zusammenspiel mit dieser Referenz eine Fülle von Strukturen geschaffen.

Diese Strukturen können gleich einem Gitter in einem Beugungsexperiment wieder durchleuchtet werden. Da bei einem Beugungsexperiment genau dort vervielfachte Lampenbilder bzw. beim Einsatz eines Lasers vervielfachte helle Flecken auftreten, wo sich die entsprechenden optischen Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$ unterscheiden, sind dieselben geometrischen Bedingungen zwischen Beugungsbild am Ort des Schirms in Position 1 und dem wie ein Gitter verwendeten Hologramm hier erfüllt, wie sie bei der Erstellung des Hologramms zwischen der direkten Beleuchtung und der Beleuchtung des Objektes vorlagen. Man sieht entsprechend jetzt in Position 1 ein Abbild des Objektes, welches durch die Beugung am durchleuchteten Hologramm entstanden ist.

⁹ Diese Tatsache macht unmittelbar verständlich, warum auch die kohärente Durchleuchtung des fotografierten Beugungsbildes einer bestimmten Struktur wieder ein Bild dieser Struktur ergibt. Man greift aus dem in *Abb. 20* in Kapitel 4.4.2 gezeigten Zusammenhang zwischen Struktur, Beugungs- und Abbild nur einen Teil heraus, nämlich den Abschnitt zwischen Beugungs- und Abbild. In diesem Abschnitt gilt für die optischen Wege ebenfalls die Bedingung $\delta_n = n \cdot \lambda$. Das „Beugungsbild“ des fotografierten Beugungsbildes der ursprünglichen Struktur entspricht dann wieder genau dieser. Insofern kann man auch davon sprechen, dass zwischen einer Struktur und ihrem Beugungsbild eine Strahlumkehr gelte.

5.4 Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel

Das nachfolgende Erweiterungsmodul führt aus, wie die Versuche am Gitter als Ausgangspunkt für die Kristall- und Festkörperphysik genommen werden können. Dazu werden an einem leicht zu überblickenden Gitter mit einer Gitterperiodizität in nur einer Richtung Begriffe der Festkörperphysik eingeführt, so dass sie dann später auf zwei- oder dreidimensionale periodische Systeme leicht zu erweitern sind. Gleichzeitig zeichnen sich die eingeführten Elemente schon durch die Vorteile, für die sie im Rahmen der Festkörperphysik bekannt sind, am einfachen Gitter aus: über das reziproke Gitter und die EWALD-Kugel lässt sich der Einfluss des Gitters von dem der Basislänge der Beleuchtung trennen. Viele spektroskopische Fragestellungen sind über einen leicht zu überblickenden Formalismus schnell zu beantworten.

Am Anfang des Moduls steht wieder der Versuch, bei dem man mit einem (aufgeweiteten) Laserstrahl ein Gitter hoher Strichzahl und kleiner Gitterkonstanten durchleuchtet und im Anschluss das Beugungsbild auf dem Schirm in der Brennebene einer Linse beobachtet (*Abbildung 17* in Kapitel 4.3.3). Für diesen Versuch soll im Folgenden ein spezielles Beispiel zu Grunde gelegt werden, und zwar eine Beleuchtung mit $\lambda = 600 \text{ nm}$ und eine Gitterkonstante von $g = 2 \mu\text{m}$. Es wird sich dann erst später der Übergang zu allgemeineren Formulierungen ergeben, damit die Problematik, welche in Bezug auf die Einheiten darzustellen ist, an einem konkreten Beispiel leichter verfolgt werden kann.

Ausgangspunkt: eine Aufgabenstellung am gängigen Schulversuch

Abbildung 32 zeigt die Draufsicht auf ein Gitter mit einer Gitterkonstanten $g = 2 \mu\text{m}$. Für eine Beleuchtung mit $\lambda = 600 \text{ nm} = 0,6 \mu\text{m}$ findet man die Richtungen für die Lampenbilder 1. und 2. Ordnung im Beugungsbild, indem man auf einem Kreis um einen Gittersteg maßstabsgetreu vom Ursprung O aus die Längen $\delta_1 = 1 \cdot \lambda$ und $\delta_2 = 2 \cdot \lambda$ abträgt. Der Kreis hat dabei einen Durchmesser von der Länge der Gitterkonstanten g , sein Mittelpunkt liegt in der Mitte des entsprechenden Gittersteges. Gemäß dem Satz von THALES sind die Dreiecke OB_1C und OB_2C rechtwinklig. Die Beugungsbilder n -ter Ordnung findet man in Richtung der Strecken $|OB_n|$.

Weitere geometrische Überlegungen treten hinzu

Verlängert man die Strecken $|OB_1|$ bzw. $|OB_2|$, bis sie eine Kugel K um O in K_1 bzw. K_2 schneiden, so sind zwei weitere rechtwinklige Dreiecke festgelegt: OK_1X_1 und OK_2X_2 . Dies gilt zunächst für jeden beliebigen Radius von K . Dem Dreieck OB_1C im THALES-Kreis entspricht das Dreieck OK_1X_1 , dem Dreieck OB_2C das Dreieck OK_2X_2 . Alle Dreiecke sind recht-

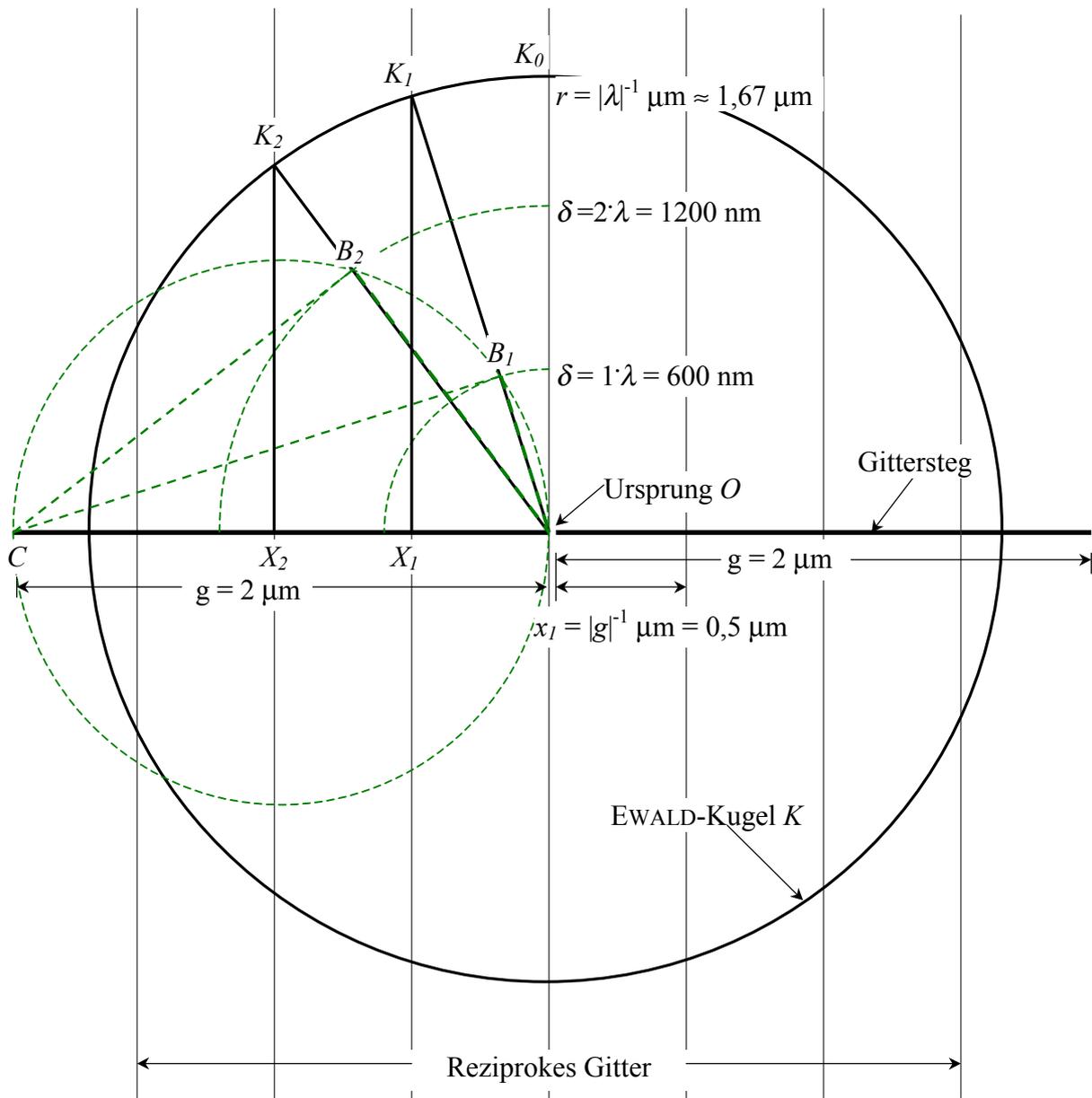


Abb. 32:

Draufsicht auf ein Gitter mit $g = 2 \mu\text{m}$. Die vertikalen Geraden stellen das reziproke Gitter dar. Ihre Schnittpunkte mit der EWALD-Kugel geben die Beugungsrichtungen an.

winklig und die einander zugeordneten Dreiecke haben den Winkel COK_1 bzw COK_2 gemeinsam. Damit sind in diesen Dreiecken alle Winkel gleich - sie sind ähnlich.

Es gilt:

$$\frac{|OB_1|}{|OC|} = \frac{|OX_1|}{|OK_1|}$$

Berücksichtigt man die Basislänge λ , die Gitterkonstante $g = |OC|$ und den Radius r der Kugel K , so ergibt sich:

$$\frac{\lambda}{g} = \frac{|OX_1|}{r}$$

Für die n -te Beugungsordnung gilt:

$$\frac{n \cdot \lambda}{g} = \frac{|OX_n|}{r} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{n \cdot \lambda}{g} \cdot r = |OX_n|$$

Die Strecken $|OX_n|$ ergeben sich zu ganzzahligen Vielfachen des Quotienten $\frac{\lambda \cdot r}{g}$. Sie liegen

äquidistant und sind von der Basislänge λ , der Gitterkonstanten g und dem Kugelradius r abhängig. Den Kugelradius r kann man frei wählen, die anderen Größen gibt das Experiment vor.

Physikalische Interpretation der geometrischen Überlegungen

Bei der Wahl des Kugelradius r hat man insbesondere auch die Freiheit, dessen Betrag $|r| = \left| \frac{1}{\lambda} \right|$ zu setzen. Man berücksichtigt dann über den Kugelradius die spektralen Eigenschaften der Beleuchtung. - Zugunsten einer einfacheren Darstellung wird im Folgenden sowohl für den Kugelradius r als auch für die Basislänge λ die Einheit μm verwendet. Dadurch werden, wie weiter unten ausgeführt wird, Schwierigkeiten vermieden, die entstehen, wenn man in Verhältnisgleichungen die Beträge von Größen mit unterschiedlichen Einheiten vergleicht.

$$\frac{n \cdot \lambda}{g} \cdot r = |OX_n| \Rightarrow |OX_n| = \frac{n \cdot \lambda}{g} \cdot \left| \frac{1}{\lambda} \right| \cdot \mu m = \frac{n \cdot |\lambda| \cdot \mu m}{|g| \cdot \mu m} \cdot \frac{1}{|\lambda|} \cdot \mu m = n \cdot \frac{\mu m}{|g|} = n \cdot x_1$$

D.h. für den Fall, dass man den Betrag des Radius der Kugel K als $|r| = \left| \frac{1}{\lambda} \right|$ festlegt, sind die

Strecken $|OX_n|$ unabhängig von der Basislänge und ergeben sich als ganzzahlige Vielfache des Betrags der reziproken Gitterkonstanten $|g|^{-1} = |x_1|$. Sie gehen auf die Struktur des Gitters zu-

rück, wie der Radius der Kugel auf die Eigenschaften der Lampe. Die Struktur des Gitters und die Eigenschaften der Lampe werden auf diese Weise in zwei voneinander unabhängigen geometrischen Elementen dargestellt, deren Schnitt dem anschaulichen Beugungsbild entspricht. Entsprechend findet man die Beugungsbilder n -ter Ordnung jetzt in Richtung der Strecken $|OK_n|$.

Herausarbeiten von Regeln und Begriffen

Um die Beugungsrichtungen zu finden, kann man also folgendermaßen vorgehen: Von einer beliebigen Gitteröffnung ausgehend zeichnet man im entsprechenden Maßstab zum Gitter senkrechte Geraden mit dem Abstand $n \cdot |g^{-1}| \cdot \mu\text{m}$. Sie bilden ein neues „Gitter“, welches man entsprechend dem Betrag seiner Gitterkonstanten $|g|^{-1}$ als *reziprokes Gitter* bezeichnet. Die Schnittpunkte des reziproken Gitters mit einer Kugel, deren Mittelpunkt in der entsprechenden Gitteröffnung liegt und deren Radius den Betrag $|r| = \left| \frac{1}{\lambda} \right|$ hat, legen in Verbindung mit dem Ursprung O die Beugungsrichtungen fest. Insbesondere können für nicht monochromatische Beleuchtungen die einzelnen Beugungsrichtungen gefunden werden, indem man *ein* reziprokes Gitter zeichnet und jede Spektrallinie durch eine gesonderte Kugel berücksichtigt. In Anlehnung an die Strukturanalyse in der Festkörperphysik bezeichnet man die bei diesem Verfahren auftretenden Kugeln als EWALD-Kugeln, wobei im Folgenden sowohl für das reziproke Gitter als auch für die EWALD-Kugel die Bezeichnungen noch begründet werden müssen.

Hat man erst einmal dieses Verfahren durchschaut, entfällt die Konstruktion über den THALES-Kreis aus *Abbildung 32*. Man entnimmt den Angaben des Experimentes oder der Aufgabenstellung die Gitterkonstante g und die Basislänge λ , um anschließend wie erläutert vorzugehen. Zusätzlich kann man der beschriebenen Zeichnung weitere Informationen unmittelbar entnehmen, die *Abbildung 32* in anderer Weise zeigt: Dort wurde eine Basislänge von $\lambda = 600 \text{ nm}$ vorausgesetzt. Für diese Basislänge gibt es drei Beugungsordnungen. Bei abnehmender Basislänge, also einer Beleuchtung, die mehr ins Bläulich-Violette geht, nimmt der Radius der EWALD-Kugel zu. Es treten mehr Beugungsordnungen auf, kommen doch neue Schnittpunkte mit dem reziproken Gitter hinzu. Umgekehrt können im Falle größerer Basislängen bei rötlicher Beleuchtung eventuell überhaupt nur zwei Beugungsordnungen auftreten.

Auch die vielen Fragen, die sich bei der Überschneidung einzelner Beugungsordnungen für verschiedene Farben ergeben, kann man so unmittelbar überblicken.

Zum Problem der Einheiten

Bearbeitet man mit den Lernenden solche Anwendungsaufgaben, muss man sorgfältig besprechen, dass Setzungen wie $|r| = \left| \frac{1}{\lambda} \right|$ oder $|g|^{-1} = |x_l|$ nur sinnvoll sind, wenn man durchweg gleiche Einheiten verwendet. Nur so hat man die Rechtfertigung, in entsprechenden Gleichungen zu kürzen. Für Beleuchtungen, deren Basislängen im sichtbaren Bereich liegen, bietet sich dabei die Einheit μm besonders an. - Verwendete man andere Einheiten, bliebe zwar das Verhältnis $\frac{n \cdot \lambda}{g}$ konstant, die Zahlenwerte in Zähler und Nenner änderten sich aber. Damit müsste das Problem der Normierung der reziproken Gitterkonstanten thematisiert werden. Da am Beginn des Lernprozesses von den Lernenden der Sachverhalt in einem möglichst einfachen Rahmen erfasst werden soll, wird hier vorgeschlagen, zunächst ausschließlich die Einheit μm zu verwenden.

Ist die Notwendigkeit, durchgängig gleiche Einheiten zu gebrauchen, von allen gründlich verstanden, mag man, ausgehend von der Einheit μm , für $\tilde{x}_1 = \frac{1}{g}$ und für $\tilde{r} = \frac{1}{\lambda}$ setzen, ohne

Betragsstriche! Für die Größen \tilde{r} und \tilde{x}_1 ergibt sich jetzt die Einheit $(\mu\text{m})^{-1}$. Wenn man sowohl für $1 \mu\text{m}$ als auch für $1 (\mu\text{m})^{-1}$ denselben Maßstab in der Zeichnung ansetzt, folgt das besprochene Ergebnis. In begabten Leistungskursen kann jetzt aber zusätzlich darauf hingewiesen werden, dass hier zwei unterschiedliche Räume, einer für Größen mit der Dimension einer Länge und einer für Größen mit der Dimension einer reziproken Länge, zusammengebracht werden. Der Ursprung beider Räume befindet sich am gleichen Ort. Er kann im Rah-

Aufgabe 1:

Ein Gitter mit 400 Strichen pro Millimeter, das senkrecht zur optischen Achse steht, wird mit zwei verschiedenen Lasern beleuchtet: $\lambda_1 = 450 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 790 \text{ nm}$. Untersuchen Sie graphisch mit Hilfe der EWALD-Kugel und des reziproken Gitters, wie viele Beugungsordnungen bei den beiden Lasern jeweils beobachtet werden können. Bestimmen Sie außerdem graphisch die Richtungen, unter denen alle auftretenden Beugungsmaxima zu sehen sind.

Hinweis:

Zeichnen Sie in eine Zeichnung sowohl das Gitter ($0,5 \mu\text{m} \equiv 1 \text{ cm}$) als auch das reziproke Gitter mit den beiden EWALD-Kugeln. (Gleicher Maßstab für μm und μm^{-1}).

men des hier vorausgesetzten Versuchsaufbaus an jedem beliebigen Ort jeder beliebigen Gitteröffnung festgesetzt werden (vgl. *Aufgabe 1*).

Die Bedeutung abstrakter Räume in der Physik kann bei dem zuletzt genannten Weg in der Schule nicht nur vorbereitet, sondern auch am Experiment entwickelt werden. Der Sprung ins Abstrakte ergibt sich dann nicht aus mathematischen Definitionen, die ohne experimentellen Vorlauf und Überblick dem Schüler bzw. Studenten oft willkürlich erscheinen, sondern als vertiefte Analyse experimenteller Gegebenheiten.

Den Lernenden ist im Rahmen dieser Unterrichtsreihe die Bezeichnung *reziprokes Gitter* durchaus plausibel, während ihnen der Name EWALD-Kugel einfach analog zu vielen vergleichbaren Bezeichnungen in der Physik mitgeteilt wird. Auf den Bezug zu den entsprechenden Begriffen der Festkörperphysik geht man in der Schule wohl nicht ein. Hier soll, wie oben bereits angekündigt, für den interessierten Leser aber trotzdem kurz aufgezeigt werden, dass sich die Begriffsbildung, geometrisch gesehen, bruchlos an die Festkörperphysik anschließt:

Dort wird die Beugung meist so formuliert: Photonen werden an einem Kristall elastisch in die Richtungen konstruktiver Interferenz gestreut, wenn sich die Wellenzahlvektoren des einfallenden und des gestreuten Photons um einen Vektor des reziproken Gitters unterscheiden. - Bis auf einen Faktor 2π entspricht in unserer Terminologie der Vektor OK_0 dem Wellenzahlvektor des einfallenden Photons. Dieser Vektor zeigt genau in die Richtung der optischen Wege vor dem Gitter, was im Photonenbild die Richtung des einfallenden Photons bedeutet. Die Richtungen der gestreuten Photonen sind die Richtungen der hellen Flecken im Beugungsbild. Bis auf einen Faktor 2π sind die Vektoren OK_n für $n \neq 0$ identisch mit den Wellenzahlvektoren der gestreuten Photonen. Schließlich entsprechen die Strecken $x_n = OX_n$ ebenfalls bis auf den Faktor 2π dem reziproken Gittervektor. An der Zeichnung kann unmittelbar abgelesen werden, wie die Anfangs- und Endpunkte der Differenzvektoren von OK_0 und OK_n auf Geraden mit den Abstandsvektoren $x_n = OX_n$ und auf der EWALD-Kugel liegen (KOPITZKI 1989). Für den Vergleich mit der Festkörperphysik mag noch angefügt werden, dass es sich bei dem besprochenen Gitter um ein Gitter mit eindimensionaler Gitterperiodizität handelt und alle Gitterstege in einer Ebene liegen. Die räumliche Begrenzung auf eine Ebene „unendlicher“ Dünne und die vergleichsweise große („unendliche“) Länge der Gitterstege bedingen die „unendliche“ Erstreckung des reziproken Gitters als Geraden, die in Rich-

tung der Gitterstege „unendlich“ dünn sind (durchgängige Reziprozität).

Kennt man die LAUE-Kegel, den Gitterkegel und die EWALD-Kugel, so findet man einen weiteren spannenden Bezug zum reziproken Gitter. Die LAUE-Kegel schneiden aus der EWALD-Kugel Kreise heraus, welche in Ebenen senkrecht zur Gitterebene und parallel zu den Gitterstegen liegen. Entsprechend schneidet der Gitterkegel, welcher in dem hier als Ausgangspunkt gewählten Versuchsaufbau zu einer Ebene entartet, einen Kreis aus der EWALD-Kugel aus. Die Schnitte der Ebenen, welche auf die LAUE-Kegel zurück gehen, mit der Ebene, die auf den Gitterkegel zurück geht, ergeben genau das reziproke Gitter. Es wird so zu einer geometrischen Struktur, die sich aus den oben formulierten Bedingungen an die optischen Wege „herauskristallisiert“.

5.4.1 Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel bei Rotationen des Gitters

Rotiert das Gitter, sei es durch Drehen, Schwenken oder Kippen (vgl. Kapitel 5.1), so ändert sich die Geometrie des Versuchsaufbaus. Im Konzept optischer Wege können aber weiterhin alle Abwandlungen der Beugungsbilder durch diese Rotationen über die beiden Bedingungen an die optischen Wege gefasst werden. Es soll im Folgenden noch untersucht werden, welche Konsequenzen das für die Lage von reziprokem Gitter und EWALD-Kugel hat.

1. Drehen

Bei Drehungen eines gut ausgeleuchteten Gitters ändert sich an den geometrischen Betrachtungen des vorangegangenen Kapitels nichts. Das reziproke Gitter dreht mit dem Gitter mit. Der Mittelpunkt der EWALD-Kugel und der Ursprung des reziproken Gitters fallen weiterhin zusammen.

2. Schwenken

Für benachbarte Gitteröffnungen unterscheiden sich vor dem Gitter die optischen Wege um die Strecke s (Abbildung 33). Um der oben in Kapitel 4.3.3 formulierten 1. Bedingung zu genügen, müssen vom Ursprung O aus die Strecken $s + n \cdot \lambda$ auf einem Kreis mit dem Durchmesser der Gitterkonstanten g und dem Mittelpunkt in der Mitte des Gittersteges abgetragen werden. Die so erhaltenen Schnittpunkte mit der Kreisperipherie und die beiden Endpunkte

hinaus schneiden die EWALD-Kugel in den Punkten K_n (Betrag des Radius $|r| = |\lambda|^{-1}$). Zu den Gitterstegen senkrechte Geraden durch diese Schnittpunkte legen die Punkte X_n fest. Die Dreiecke OCB_n sind mit den Dreiecken OX_nK_n ähnlich (vgl. voriges Kapitel).

Im Einzelnen gelten unter Verwendung der Einheit μm und mit $\Delta x_n = |X_0X_n|$:

$$\frac{s}{g} = \frac{x_0}{r} = \frac{x_0}{\left|\frac{1}{\lambda}\right| \cdot \mu\text{m}} = \frac{|\lambda| \cdot x_0}{\mu\text{m}} \quad (1)$$

$$\frac{s + n \cdot \lambda}{g} = \frac{x_0 + \Delta x_n}{\left|\frac{1}{\lambda}\right| \cdot \mu\text{m}} \Leftrightarrow \frac{s}{g} + \frac{n \cdot \lambda}{g} = \frac{|\lambda| \cdot x_0}{\mu\text{m}} + \frac{|\lambda| \cdot \Delta x_n}{\mu\text{m}} \quad (2)$$

(1) in (2) eingesetzt vereinfacht (2) zu:

$$|\lambda| \cdot \mu\text{m} \cdot n \cdot \frac{1}{g} = \frac{|\lambda| \cdot \Delta x_n}{\mu\text{m}} \Leftrightarrow \Delta x_n = n \cdot \frac{(\mu\text{m})^2}{g} = n \cdot \frac{\mu\text{m}}{|g|} = n \cdot |x_1| \cdot \mu\text{m} = n \cdot x_1$$

Die Strecken $\Delta x_n = |X_0X_n|$ sind ganzzahlige Vielfache der Strecke x_1 mit $|x_1| = \left|\frac{1}{g}\right|$. Die Gera-

den durch X_n und K_n bilden auch hier das reziproke Gitter mit einer Gitterkonstanten vom Betrag $|x_1|$. Im Versuch verschiebt sich mit dem Schwenken des Gitters das reziproke Gitter gegen die EWALD-Kugel. Die EWALD-Kugel behält ihren Ursprung, während der Ursprung des reziproken Gitters auf dem Gittersteg wandert. Dabei stehen die Geraden des reziproken Gitters stets senkrecht auf ihm. In der „Anbindestelle“ des reziproken Gitters an die EWALD-Kugel schneidet sich die Gerade des reziproken Gitters, die auch durch dessen Ursprung läuft, mit einem optischen Weg, der zur nullten Ordnung gehört. Den Ursprung des reziproken Gitters findet man also, wenn man vom Schnittpunkt dieses optischen Weges mit der EWALD-Kugel auf den Gittersteg ein Lot fällt.

Beim Schwenken des Gitters verschieben sich die EWALD-Kugel und das reziproke Gitter gegeneinander; die Richtungen der Lampenbilder n-ter Ordnung im Beugungsbild sind weiterhin durch die Schnitte von reziprokem Gitter und EWALD-Kugel gegeben.

Ergänzte man in *Abbildung 33* auch rechts vom Ursprung die Geraden des reziproken Gitters, könnte man aus der Zeichnung unmittelbar ablesen, warum beim Schwenken des Gitters im Beugungsbild die Lampenbilder rechts und links von der nullten Ordnung unterschiedlich schnell auseinander laufen.

3. Kippen

Kippt man das Gitter, so sind die optischen Wege einer Gitteröffnung vor und hinter dem Gitter unterschiedlich lang. Für diese Situation musste in Kapitel 5.1.2 die 2. Bedingung an die optischen Wege (Kapitel 4.3.3) zum Anlass genommen werden, den Gitterkegel einzuführen, während die 1. Bedingung auf die LAUE-Kegeln führte.

Die LAUE-Kegel schneiden aus einer EWALD-Kugel, deren Mittelpunkt in einer Gitteröffnung sitzt, Kreise heraus. Diese Schnittkreise liegen in Ebenen, welche alle voneinander um den Betrag $|x_1| = \left| \frac{1}{g} \right|$ voneinander entfernt sind. - Sofern man in der Draufsicht der *Abbildung 33*

die Dreiecke OX_nK_n um eine Achse durch die Gitterstege rotieren lässt, wird dieser Zusammenhang unmittelbar klar. Der Gitterkegel schneidet ebenfalls aus der EWALD-Kugel einen Schnittkreis heraus. Dessen Ebene schneidet die Ebenen, welche auf die Schnittkreise der LAUE-Kegel zurückgehen, in Geraden, die alle im Abstand von x_l parallel zueinander liegen und senkrecht auf dem gekippten Gitter stehen. Sie bilden das reziproke Gitter. Auch hier ist der Ursprung des reziproken Gitters gegen den Mittelpunkt der EWALD-Kugel verschoben. Die Gerade des reziproken Gitters, die durch dessen Ursprung läuft, schneidet, wie schon beim Schwenken, den optischen Weg, der zur nullten Ordnung gehört, auf der EWALD-Kugel. Auch hier findet man umgekehrt den Ursprung des reziproken Gitters, indem man ein entsprechendes Lot fällt.

Sämtliche Beugungsordnungen lassen sich damit nach folgender Vorschrift finden: Ein beliebiger Punkt der Gitteröffnung bildet den Mittelpunkt der EWALD-Kugel mit einem Radius vom Betrag $|r| = \frac{1}{|\lambda|}$. Eine Gerade parallel zur optischen Achse durch den Mittelpunkt der

EWALD-Kugel schneidet diese in der „Anbindestelle“ des reziproken Gitters an die EWALD-Kugel. Das Lot von der Anbindestelle auf die Gitterebene bestimmt den Ursprung des reziproken Gitters. Das reziproke Gitter besteht aus zu diesem Lot parallelen Geraden, die in einem Abstand vom Betrag $|x_1| = \frac{1}{|g|}$ zueinander liegen. Sie sind Elemente einer Ebene parallel zur Richtung, in welcher man die Gitterkonstante g angibt. Die Vektoren vom Ursprung der Ewald-Kugel zu deren Schnittpunkten mit dem reziproken Gitter geben die Richtungen

der Lampenbilder im Beugungsbild an. *Rotationen des Gitters entsprechen in einem „Reziproraum“ Translationen zwischen reziprokem Gitter und EWALD-Kugel.*

Die Erweiterung der im Kerncurriculum eingeführten und entwickelten phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege hin zu Elementen der Festkörperphysik wird sicherlich nur in Einzelfällen ausführlich in der Schule zur Anwendung kommen. Es ist auch nicht das Ziel dieser Ausführung, eine besondere Ausrichtung der Beugung auf die Festkörperphysik für die Schule zu fordern. Vielmehr soll an einem Beispiel exemplarisch gezeigt werden, dass der Übergang von der Schule zur Universität durch einen Unterricht im Konzept optischer Wege nicht behindert oder gar erschwert wird. Vielmehr können die optischen Wege eine didaktische Brücke von vergleichsweise noch leicht zu überblickenden Versuchen am eindimensionalen Gitter zu komplizierteren oder auch abstrakteren Zusammenhängen am dreidimensionalen Festkörper schlagen.

5.5 Ausblick auf weitere mögliche Erweiterungsmodule

Die hier präsentierten Erweiterungsmodule stellen nur eine kleine Auswahl dar, welche aus einer Fülle möglicher Ergänzungen zum Kerncurriculum exemplarisch herausgegriffen worden ist. So könnte man neben dem MICHELSON-Interferometer viele weitere Anwendungen der Interferometrie phänomenologisch beschreiben und im Konzept optischer Wege formulieren: die Zweistrahlinterferenz an dielektrischen Schichten, insbesondere auch die NEWTONSchen Ringe, Aufbau und Funktion der Spiegel-Interferometer einschließlich des MACH-ZEHNDER-Interferometers und schließlich die Mehrstrahlinterferenz mit dem FABRY-PEROT-Interferometer. Bei dem zuletzt genannten Interferometer wäre eine Überlagerung der entsprechenden Spiegelräume zu thematisieren und der Vergleich zur Beugung am Gitter auszuarbeiten.

Die FRESNEL-Beugung einschließlich der Behandlung der Zonenplatte stellt einen weiteren möglichen Themenkomplex dar, der sich anschließen könnte. Vom phänomenologischen Gesichtspunkt aus böte es sich dabei an, auf erste Vorarbeiten von SEIPP zurückzugreifen (SEIPP 2002). Aber auch der technische Einsatz von Zonenplatten bis hin zum Aufbau von Röntgenmikroskopen wäre dann zu besprechen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht angestrebt, eine umfassende Anwendung des Konzeptes optischer Wege im Rahmen der phänomenologischen Optik vorzustellen, sondern vielmehr sollte zunächst die FRAUNHOFERSCHE Beugung am Gitter phänomenologisch untersucht und didaktisch in bestehende curriculare Ansätze integriert werden. Davon ausgehend wurden *exemplarisch* einige Erweiterungen ausgearbeitet. Diese sind in dem hiermit nun abzuschließenden Kapitel vorgestellt.

6 Erprobung

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Curriculum zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege geht aus langjähriger Unterrichtserfahrung hervor. Viele Elemente des Curriculums sind unmittelbar der Unterrichtserfahrung entnommen. Damit ist bereits während der Konzeptionsphase die Rückkopplung durch die Schulpraxis stets eingeflossen.

Nachdem das Gerüst des Curriculums stand, wurde das Kerncurriculum im Schuljahr 2001/2002 in einem Grundkurs und in einem Leistungskurs Physik von dem Autor selbst erprobt. In demselben Leistungskurs wurden im Schuljahr 2002/2003 außerdem Teile der Erweiterungsmodule unterrichtet. Sowohl die Inhalte des Kerncurriculums als auch der Erweiterungsmodule flossen in einen Aufgabenvorschlag der schriftlichen Abiturprüfung für den Leistungskurs ein (siehe Anhang A). Nach den Erfahrungen dieser Unterrichte wurde das Curriculum nochmals in Aspekten überarbeitet und in der hier vorgestellten Form gefasst. Dem schloss sich eine erneute Erprobung bzw. explorative Studie des Kerncurriculums und einiger Erweiterungsmodule in einem Leistungskurs Physik im Schuljahr 2004/2005 an.

Die Schülerinnen und Schüler der unterrichteten Grund- und Leistungskurse besuchten die gymnasialen Oberstufen der Freien Waldorfschulen Frankfurt bzw. Kassel. Sie waren ab der 6. Klasse in Optik nach dem Curriculum „Modellfreie Optik“ von MACKENSEN (Kapitel 3.1) unterrichtet worden. Da die Freien Waldorfschulen als Schulen besonderer pädagogischer Prägung nicht an die staatlichen Lehrpläne, wohl aber an die Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung (EPA) gebunden sind, war es möglich, in dieser Schulform noch in der Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe das Curriculum zu erproben.

Im Rahmen einer Schülervorlesung an der J. W. GOETHE-Universität Frankfurt am 20.11.2003 wurde die Beugung im Konzept optischer Wege außerdem den Schülerinnen und Schülern eines Grund- und eines Leistungskurses der Taunusschule in Königstein vorgestellt. Diese Schüler hatten zuvor die Beugung im Wellenmodell kennengelernt, wie es die Lehrpläne des Landes Hessen vorsehen.

Die Erfahrungen der Schülervorlesung und der Unterrichte in den Schuljahren 2001/2002 bzw. 2002/2003 sind in dem Kapitel Vorstudien zusammengefasst. Die Erprobung des Kerncurriculums und einiger Erweiterungsmodule in einem Leistungskurs Physik im Schuljahr

2004/2005 wird hingegen in den daran anschließenden Kapiteln ausführlicher dokumentiert. Sie schloss im engeren Sinne die Curriculumsentwicklung ab und wird daher hier *abschließende Erprobung* genannt.

6.1 Vorstudien

6.1.1 Vorstudien im Leistungskurs

Der Leistungskurs Physik, in dem sowohl das Kerncurriculum als auch Teile der Erweiterungsmodule „Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel“ (Kapitel 5.4) und „Zeigerformalismus und Übergang zur Quantentheorie“ (Kapitel 5.2) vom Autor unterrichtet wurden, fand in den Schuljahren 2001/2002 und 2002/2003 an der Freien Waldorfschule Frankfurt statt.

Im Laufe der Qualifikationsphase wurde eine Klausur zum Thema Beugung mit einem Klassenschnitt von 9,2 Punkten geschrieben; einer der beiden eingereichten Aufgabenvorschläge für das schriftliche Abitur enthielt außerdem eine Aufgabe zur Beugung (Anhang A). Dieser Vorschlag wurde durch das Staatliche Schulamt Frankfurt genehmigt, nicht aber als Prüfungsaufgabe gewählt. Den Leistungskurs besuchten 18 Schülerinnen und Schüler.

Im Anschluss an die Abiturprüfungen, nach Aushändigung der Zeugnisse, wurden die Schülerinnen und Schüler gebeten, noch einige Fragen bezüglich des Unterrichtsganges zur Beugung zu beantworten. Durch den Zeitpunkt der Befragung war sichergestellt, dass die Äußerungen keinerlei Rückwirkung auf die Benotung haben konnten. Von den angeschriebenen 18 Schülern antworteten 10 Schüler.

Durch offene Fragestellungen erhielten die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit, ihnen Wichtiges zu nennen und ihre Reflexion außerhalb eines Netzes allzu einschränkender Kategorien zu führen, handelte es sich doch um eine informelle Erhebung einer Vorstudie. Gleichzeitig konnte so ermittelt werden, was sich den Schülern besonders eingepägt hatte bzw. was sie als zentral und wichtig erlebten. Im Einzelnen waren die Fragen wie folgt formuliert:

1. Wie haben Sie den Unterrichtsgang zur Beugung erlebt?
2. Sind für Sie das Beugungsbild und Abbild beispielsweise eines Gitters zwei Dinge, die unmittelbar zusammen gehören oder sind es zwei getrennte Dinge, die nur bei dem von uns gewählten Versuchsaufbau eben gemeinsam auftraten?

3. War es für Sie schwierig, Welcher-Weg-Experimente zu verstehen, nachdem wir die Beugung behandelt hatten? Ähnelte das Verstehen der Welcher-Weg-Experimente eher einem Akzeptieren, dass es eben so ist?
4. Bereitet die Art des Verständnisses, in welchem wir uns bei der Beugung geschult hatten, auf die Atomphysik gut vor?

Bei der ersten Frage nach dem Unterrichtsgang zur Beugung antworteten die meisten Schüler, dass sie das Behandelte gut nachvollziehen konnten und sie den Unterrichtsgang als gut strukturiert empfunden hätten. Allerdings bemerkten drei Schüler, von denen einer ausgesprochen souverän war, dass sich ihnen erst „im zweiten Anlauf“ der Stoff im Überblick darstellte. Der sehr gute Schüler (D. M.) führte aus: „Vor allem das FERMAT-Prinzip verhalf mir zu einem Verständnis von ‚optischen Wegen‘, welches auf die Beugung zu übertragen war. Als ich plötzlich verstand, was die Ableitung des Gesamtweges anschaulich bedeutete, wusste ich mir mit einem Mal auch von einem ‚optischen Weg‘ ein Bild zu machen. Dann war auch die Beugung für mich zu erschließen. ... Wirklich faszinierend war dann die EWALD-Kugel. ... Es war hoch interessant, quasi direkt das Zusammenspiel von Gitterkonstante und Wellenlänge beobachten zu können.“ - Diese Bemerkung des Schülers war in der weiteren Entwicklung des Curriculums Anlass dafür, die Bedingungen, welche bei der Beugung in Erweiterung des FERMAT-Prinzips an die optischen Wege gestellt werden müssen, noch klarer herauszuarbeiten.

Ein Schüler (T. S.) antwortete lediglich: „Man wurde von verschiedenen Richtungen an die Lösung eines Problems herangeführt“. Ein weiterer, sehr begabter Schüler (C. B.) schrieb: „...Gedeutet wurden die Versuchsergebnisse anhand von geometrischen Kriterien, wodurch die Ergebnisse unmittelbar verständlich wurden. Durch das schrittweise Heranführen an die geometrischen Gesetze, die bei der Beugung auftreten, war der Unterricht immer gut nachvollziehbar. Später wurde die rein geometrische Betrachtungsweise ergänzt durch theoretische Modellvorstellungen. Hätten diese jedoch am Anfang des Verständnisprozesses gestanden, so wäre das ‚Verstehen‘ sicherlich ein reines Akzeptieren der Sachverhalte gewesen“. - Während der zuerst zitierte Schüler offensichtlich durch den Gang des Unterrichtes beim Thema Beugung die Physik als geschlossenes Gedankengebäude erlebte, hat der im Anschluss zitierte Schüler, indem er die erste Frage beantwortet, schon die dritte Frage im Hintergrund. Es wird

dadurch hier sehr deutlich, wie dieser Schüler die Modellvorstellungen, welche er später kennenlernte, in seine Wissensbasis integriert hat und als Referenz das Bedingungsgefüge der optischen Wege beibehalten kann.

Bei der zweiten Frage antworten alle Schüler übereinstimmend, dass für sie Beugungsbild und Abbild unmittelbar zusammen gehören. Insbesondere untermauerten die meisten Schüler an Hand von den im Unterricht gemachten Experimenten zur optischen Filterung ihre Aussage. Ein Schüler (D. M.) führt noch aus: „...Danach war es sinnlos, Beugungsbild und Abbild als getrennte, zufällig gemeinsam auftretende Dinge aufzufassen. So war es auch absolut logisch, die Notwendigkeit von existierenden Beugungsordnungen für strukturierte Abbilder zu akzeptieren“. - Hier wird also der Zusammenhang zum Auflösungsvermögen bei einer optischen Abbildung selbständig angeführt.

Bei der dritten Frage variieren die Antworten sehr. Viele der Schüler betonen, dass sie zunächst nicht leicht die Erscheinungen Welcher-Weg-Experimente annehmen konnten: „...Es war schwer, an diesem Punkt die Sache anzunehmen und als logisch zu empfinden“ (H. M.). Auch wird immer wieder angeführt, dass sie einige Zeit zum Verständnis benötigten: „...Am Anfang empfand ich es als reines Akzeptieren, später hatte ich das Gefühl, manches erklären zu können“ (K. S.). Oder: „Nachdem mir die Beugung zum Großteil klar war, war nach einiger Zeit der Zusammenhang zwischen Welcher-Weg-Experiment und Beugung deutlich. Jedoch nicht von heute auf morgen; es bedurfte einige Zeit und Übung (Vorstellungs-Übung), um die Zusammenhänge zu verstehen“ (C. B.). Nur ein Schüler antwortet in unbeschwerter Weise: „Das Welcher-Weg-Experiment ist für mich auf jeden Fall einleuchtend gewesen. Wenn man mit Detektoren die Flugbahn eines Photons bestimmen möchte, kann man nicht mehr das Gitter oder den Doppelspalt als Gesamtheit sehen, sondern man erhält für jeden Spalt die jeweilige Durchflugwahrscheinlichkeit“ (S. B.). - Diese Schüleraussagen bestätigen wieder einmal, welche Herausforderung die Quantentheorie für unser Denken bedeutet. Sie wurden zum Anlass genommen, das Curriculum noch stärker didaktisch zu elementarisieren und schließlich den Begriff der kontextualen Abbildung einzuführen, um den Begriff der Gesamtheit, als welche das Gitter quantentheoretisch gesehen werden muss, vorzubereiten.

Die vierte Frage beantworteten schließlich, sieht man von einer Ausnahme ab, alle Schüler dahingehend, dass sie durch die Art des Verständnisses, in welcher sie durch die Beugung geschult worden seien, als gute Vorbereitung für die Atomphysik erlebt hätten. Treffend bemerken einige der Schüler, dass sie allerdings mangels Überblick über Alternativen nicht beurteilen könnten, ob der im Unterricht beschrittene Weg der optimale sei. Viele Schüler führten ihre Aussage anhand des Zusammenhangs von Welcher-Weg-Experimenten und dem Aufbau der Wellenfunktion beim linearen Potentialtopf aus. Dort war im Unterricht ausführlich thematisiert worden, wie dem Weg des Photons sowohl durch die eine als auch die andere Öffnung am Doppelspalt die Bewegung des Elektrons sowohl nach rechts als auch nach links im Potentialtopf entspricht. Ein Schüler schließlich fasst seine Antwort wie folgt zusammen: „In dem Sinne, dass wir gelernt haben, Modelle oder Theorien zu akzeptieren, welche für uns nie greifbar waren und auf rein mathematischer Basis eine Schlüssigkeit aufwiesen, kann ich mit ‚Ja‘ antworten“ (T. S.).

Da diese vier sehr offen formulierten Fragen für die Schülerinnen und Schüler viele Möglichkeiten offen ließen, die Fragen zu beantworten, gleichzeitig aber viele der Ziele, auf die das Curriculum hin ausgerichtet ist, selbständig genannt wurden, habe ich den Rahmen des Curriculums in der weiteren Arbeit beibehalten. Die Rückmeldungen über die Praktikabilität und die Verständnisschwierigkeiten zeigten, dass in der didaktischen Elementarisierung auf einige Elemente besonderer Wert zu legen ist. Diese Elemente sind insbesondere die Bedingungen an die optischen Wege bei der Beugung und ihr Bezug zu den Bedingungen bei einer Linsenabbildung. Diese Bedingungen müssen sehr klar im Rekurs auf das FERMAT-Prinzip formuliert werden. Des weiteren tritt die kontextuale Abbildung hinzu. Dafür muss aber durch den Unterricht - am besten anhand von Versuchen - einsichtig werden, inwieweit das Gitter als eine Gesamtheit zu sehen ist. Hierfür wurde der in Kapitel 4.4.2 dargestellte Versuch in das Curriculum aufgenommen.

Die insgesamt gesehen gute Resonanz und die mit weitgehend sauberem Methodenbewusstsein gegebenen Antworten der Schülerinnen und Schüler führten dazu, diese Zwischenbilanz positiv zu bewerten und den eingeschlagenen Weg weiterzuverfolgen.

6.1.2 Vorstudien durch die Schülervorlesung

An vielen Freien Waldorfschulen ist der Physikunterricht auf eine Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen hin angelegt. Insbesondere fand der im vorangehenden Kapitel besprochene Unterricht im Leistungskurs Physik mit Schülerinnen und Schülern statt, welche diese Art der Erkenntnisbildung im Laufe ihrer Schulzeit schon kennen gelernt hatten.

Im Rahmen einer Schülervorlesung an der J. W. GOETHE-Universität Frankfurt wurde am 23.11.2003 erprobt, wie Schülerinnen und Schüler, die zuvor die Beugung im Wellenmodell kennen gelernt haben, die phänomenologische Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege rezipieren. Diese Schülerinnen und Schüler besuchten den Grund- bzw. Leistungskurs Physik in der Jahrgangsstufe 13 an der Taunusschule Königstein.

Um den speziellen methodischen bzw. epistemologischen Ansatzpunkt einer phänomenologischen Beschreibung im Rahmen der Optik einzuführen, wurde anhand der Vorstellungen von SNELLIUS, DESCARTES und FERMAT entwickelt, was Modelle und geometrische Ordnungselemente leisten. Nach der Einführung des optischen Weges trat eine Erläuterung des FERMAT-Prinzips, welches den Schülern noch nicht bekannt war, hinzu, und zwar in anschaulicher Art anhand der Ansicht von Dingen unter Wasser.

Diesem ersten inhaltlichen Punkt war eine Vorstellungsübung vorausgegangen, durch die über die Rotation von Dreiecken die LAUE-Kegel und der Gitter-Kegel vorbereitet wurden. Die Übung verfolgte das Ziel, nicht nur das Interesse gleich am Anfang zu bündeln, sondern auch das gedanklich anspruchvollste Element der Vorlesung noch vorzubereiten, solange die Konzentration wenig belastet war. Damit ergab sich folgende Gliederung:

- Vorstellungsübung zur Vorbereitung der LAUE- und Gitter-Kegel.
- Einführung der optischen Wege und des FERMAT-Prinzips durch einen historischen Exkurs
- Freihandexperimente zur Beugung.
- Analyse der Freihandexperimente am abgelösten Versuch und Formulierung der Bedingungen, die dadurch an die optischen Wege zu stellen sind.
- Versuch zu Rotationen des Gitters.
- Herleitung der LAUE- und Gitterkegel.

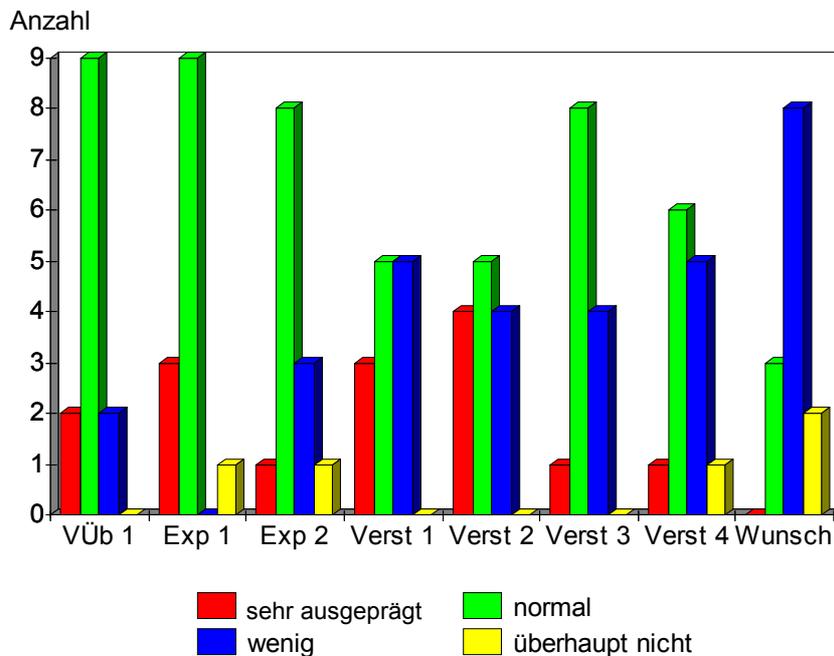
Einige Tage nach der Vorlesung erhielten die Schülerinnen und Schüler einen Fragebogen, durch den sowohl die Stellung der Vorstellungsübung zu Beginn als auch das Verständnis und die Akzeptanz der Vorlesung abgefragt wurden. Als Rücklauf trafen die Antworten von 13 Schülerinnen und Schülern ein.

Der in Anhang B wiedergegebene Fragebogen gab den Schülern auf einer vierstufigen Skala die Möglichkeit, sich zur Stellung der Experimente bzw. zur Vorstellungsübung, zum Erklärungsweg und zum Verständnis zu äußern. Lediglich in Frage 8 trat noch die Möglichkeit hinzu, neben der vierstufigen Skala zur Verständlichkeit der Auswertung noch ein allgemeines Befremden in Form der Antwort „nein, die Erklärung war irgendwie komisch“ zu verbalisieren. Da keiner der Schüler diese Antwort wählte, ist im Folgenden nur die Verteilung der Antworten auf der vierstufigen Skala wiedergegeben. Frage 6 lässt sich jedoch nicht in diese Kategorisierung einordnen und wird deshalb nicht in die graphische Darstellung aufgenommen.

Zum Abschluss des Fragebogens konnten die Schülerinnen und Schüler noch frei auf die Frage antworten, wie sie den Erklärungsweg, den sie in der Vorlesung kennen gelernt hatten, im Vergleich zum Wellenmodell erlebten. Es antworteten 6 Schüler, deren Aussagen hier im Einzelnen wiedergegeben werden sollen:

1. „Ich finde beide Lösungsansätze interessant, wobei mir die Vorstellung des Wellenmodells einfacher erscheint und mehr vertieft wurde. Allerdings finde ich es wünschenswert, öfters alternative Lösungsmöglichkeiten zu bieten.“
2. „Ist nicht so handfest, aber, wenn man es versteht, einfacher und nicht mit Widersprüchen belastet.“
3. „Habe den Vortrag nur teilweise verstanden, daher konnte ich die Parallelen nicht verstehen. Der Vortrag hat mir nur wenig gebracht.“
4. „Interessanter Ansatz auf der Basis eines nicht mit Wellendependenzen verknüpften Modells.“
5. „Das Welle-Teilchen-Modell ist realitätsnäher und greifbarer als ein zu mathematischer Erklärungsansatz.“
6. „Da der Sachverhalt durch das Wellenmodell einfacher erklärt wird und es auch für andere Modelle einfache Erklärungen gibt, ist der Erklärungsweg zwar richtig, aber unnötig.“

Aus der Verteilung der Antworten in *Abbildung 34* erkennt man unmittelbar, wie Vorstellungsbücherei zu Beginn motiviert und die Experimente faszinieren bzw. auf die Erklärung neugierig machen. Auch wird die Vorlesung von knapp zwei Dritteln als verständlich oder sehr



VÜb 1:	Bedeutung der Vorstellungsbücherei zu Beginn für die Motivation (Frage 2).
Exp 1:	Faszination der Freihandexperimente (Frage 3).
Exp 2:	Neugierde auf die Erklärung durch die Freihandexperimente (Frage 4).
Verst 1:	Verständlichkeit der Schülervorlesung (Frage 1).
Verst 2:	Beitrag des historischen Exkurses zur Verständlichkeit (Frage 7).
Verst 3:	Anspruchsniveau des Erklärungsweges im Vergleich zum sonstigen Physikunterricht (Frage 5).
Verst 4:	Verständlichkeit der Auswertung (Frage 8).
Wunsch:	Häufigkeit, mit der Erklärungswege der vorgestellten Art gewünscht werden (Frage 9).

verständlich eingestuft. Die meisten erleben das Niveau der Vorlesung im Vergleich zu ihrem sonstigen Physikunterricht als anspruchsvoll.

Bei der Frage nach der Verständlichkeit der Auswertung der vorgestellten Versuche und ob die Auswertung sie zufrieden stelle, stimmen ca. 50% eher zu, während die anderen 50% eher ablehnend sich äußern. Schließlich wird die Frage, ob sie häufiger Erklärungswege der vorgestellten Art wünschen, nur von wenigen mit „ja, immer wieder“ beantwortet, während die meisten „von Zeit zu Zeit wäre das in Ord-

Abb. 34:

Ergebnisse des Fragebogens zur Schülervorlesung am 23.11.2003

nung“ angeben und zwei sich ganz ablehnend äußern.

Auffallend ist, dass die Vorstellungsübung und die Experimente rundum positiv rezipiert werden, während bei den Fragen nach dem Verständnis schon mehr kritische Stellungnahmen auftreten. Bei der Frage nach der Verständlichkeit des Erklärungsweges halten sich schließlich positive wie negative Stellungnahmen ungefähr die Waage und der Wunsch, häufiger Erklärungswege der dargestellten Art kennenzulernen, wird eher abgelehnt. Betrachtet man dieses Ergebnis auf dem Hintergrund, dass es für die Schüler die erste Begegnung mit einem Erklärungsansatz war, der auf die Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen abzielt, so muss das nicht verwundern. Der Einsatz von Modellen wird hier ja gerade zu Gunsten einer der Quantentheorie näher stehenden Denkweise zurückgehalten. Damit entfällt hier die Anschaulichkeit bzw. die mechanische Analogie des Wellenmodells. In Antwort Nr. 5 bemerkt die entsprechende Schülerin bzw. der entsprechende Schüler treffend, dass das Welle-Teilchen-Modell greifbarer und realitätsnäher sei; in Antwort Nr. 2 wird es als nicht so handfest bezeichnet. - Interessant an der Antwort Nr. 5 ist, dass in der entsprechenden Äußerung das Wellenmodell und das Teilchenmodell zu einem Welle-Teilchen-Modell verschmelzen, das zudem realitätsnäher sei. Hier deutet die Schülerin oder der Schüler das Modell ontologisch und übersieht, dass er komplementäre Aspekte zweier unterschiedlicher Modelle thematisiert. Genau diese Denkrichtung versucht, wie in Kapitel 2 bereits ausgeführt, die Erkenntnisbildung durch Ordnung von Erscheinungsreihen zu vermeiden. Dies bedeutet aber, dass man auf die Griffigkeit und Anschaulichkeit des Wellenmodells zunächst verzichten muss, gleichzeitig aber weiterhin anspruchsvolle Physik treibt (Verst 3). Dafür hat man dann eine andere Grundlage, die Umwälzungen in der Physik des 20. Jahrhunderts zu thematisieren und die Modellkompetenz bzw. den pragmatischen Wert von Modellen auf der Referenz der Ordnung von Erscheinungsreihen zu entwickeln. Diesen Zusammenhang konnten die Schülerinnen und Schüler, welche die Schülervorlesung besuchten, nicht sehen, weil sie so weit im Unterricht noch nicht vorangeschritten waren. Außerdem hatten sie die Beugung unter dem Aspekt des Wellenmodells kennengelernt, entsprechend in dieser Weise mehr geübt, so dass sie sich dort sicherer fühlten. So verwundert es nicht, dass kein hohes Anliegen, den in der Vorlesung vorgestellten Erklärungsweg häufiger zu beschreiten, entstand. In der Antwort Nr. 6 werden schließlich das Wort Sachverhalt und Modell synonym verwendet, was ein weiterer

Hinweis darauf ist, wie stark an die Stelle von Methodenbewusstsein eine Gleichsetzung von Modell und Wirklichkeit vorlag.

Somit verdeutlichen die Erfahrungen und die Auswertung der Schülervorlesung, dass die Beugung mit einer phänomenologischen Beschreibung im Konzept optischer Wege in der Schule nicht deswegen zur Anwendung kommen mag, weil dieser Weg leichter ist, sondern vielmehr, weil er die Denkweise der Quantentheorie anlegt und fördert. Damit treten aber selbstverständlich auch die Herausforderungen an die Schülerinnen und Schüler heran, die gerade diese Denkweise prägen.

6.2 Abschließende Erprobung – Ziele und Methoden der Untersuchung

Nachdem die verschiedenen Unterrichtserfahrungen noch während der Konzeptionsphase immer wieder zur Überarbeitung des Curriculums geführt hatten, wurde der sich schließlich daraus ergebende Aufbau, so wie er in dieser Arbeit dargestellt ist, nochmals erprobt. Dazu unterrichtete der Autor an der Freien Waldorfschule Kassel in der Jahrgangsstufe 13 in einem Leistungskurs Physik das Kerncurriculum und Teile der Erweiterungsmodule „Zeigerformalismus und Übergang zur Quantentheorie“ bzw. „Rotationen der Gitters: LAUE-Kegel“.

Die abschließende Erprobung wurde dabei auf folgende Gesichtspunkte fokussiert:

- Dokumentation und Charakterisierung der epistemologischen Überzeugungen der Lernenden als eines integralen Anteiles ihres Fachverständnisses.
- Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses.

6.2.1 1. Ziel: Dokumentation und Charakterisierung der epistemologischen Überzeugungen

Das Ziel, die epistemologischen Überzeugungen der Lernenden zu dokumentieren und zu charakterisieren, ist durch den Aufbau des Curriculums begründet. Dieser Aufbau spricht eine epistemologische Schicht der Physik besonders an. Neben den grundlegenden Ausführungen

im 2. Kapitel wird das auch aus den Erläuterungen zur Struktur und Zielrichtung des Kerncurriculums bzw. dessen Erweiterungsmodulen deutlich. In diesem Zusammenhang sind folgende Punkte hervorzuheben:

1. *Verständnisebene des Kerncurriculums*

Im Rahmen von Versuchsreihen kommt der Beobachtung eine große Bedeutung zu und anschließend werden in dem durch die Beobachtung aufgespannten Rahmen immanente Ordnungselemente aufgesucht. Diese sind im Kerncurriculum von gleicher Art wie der durch Bedingung und Erscheinung festgelegte Kontext. Nähe zur Erscheinung, Vertrauen in die Sinne und eine gedankliche Verständnisebene, die im Rekurs auf die Erscheinung gefasst wird, formen so u. a. die epistemologischen Überzeugungen als einen integralen Anteil des Fachverständnisses.

2. *Übergang zu abstrakten Ordnungselementen*

Mit dem Übergang zur Quantentheorie treten zu den immanenten Ordnungselementen des durch Bedingung und Erscheinung festgelegten Zusammenhangs mit den Zeigern abstrakte Ordnungselemente hinzu. Eine Charakterisierung der epistemologischen Überzeugungen der Lernenden beim Wechsel von anschaulichen zu abstrakten Ordnungselementen lässt deutlich werden, inwiefern diese dabei ihre Überzeugungen ggf. modifizieren.

3. *Modellrezeption*

Die Bedeutung anschaulicher Lichtmodelle wird auf dem Hintergrund eines Optikunterrichtes im Konzept optischer Wege thematisiert. Als Referenz dieser Thematisierung steht die Behandlung immanenter und abstrakter Ordnungselemente zur Verfügung. Das beeinflusst die Art, wie die Lernenden die Modelle bewerten und insbesondere, welche ontologische Dimension sie ihnen zusprechen.

4. *Geschlossenheit der Physik*

Das auf Tragfähigkeit der Inhalte *und* Methoden hin angelegte Curriculum soll die Wahrnehmung der Physik als eines einheitlichen und Geschlossenheit ermöglichenden Gedankengebäudes befördern.

Ziel der Untersuchung ist es, diese epistemologischen Aspekte zu erfassen. Dazu sollen Schüleräußerungen in deskriptiver Form festgehalten werden. Es handelt sich also nicht um eine bestimmte Hypothesen überprüfende Untersuchung, vielmehr wird angestrebt, die aus

epistemologischen Überzeugungen heraus zu Tage tretenden Denkrichtungen der Schülerinnen und Schüler zu dokumentieren und zu charakterisieren.

Die qualitative Ausrichtung der Untersuchung wird gewählt, weil der Untersuchungsgegenstand, das Kerncurriculum mit seinen Erweiterungsmodulen, selbst auf eine qualitative Ebene des Lernprozesses hin ausgerichtet ist: Wie bereits ausgeführt, soll durch curriculare Rahmenbedingungen eine Physikrezeption erreicht werden, die eine sinnliche Rezeption fördert und ihr einen hohen Wert zuschreibt. Die dialogische Beobachtungsdisposition und der beschreibende Ansatz (Kapitel 2) sind so angelegt, dass sie dem Subjekt, welches sich unter dem Blickwinkel physikalischer Fragestellungen der Welt zuwendet, auch als Sinneswesen einen Wert zusprechen und es nicht als ein Individuum einführen, dessen Wahrnehmungen gegenüber den *objektiven* Versuchen der Physik eben *nur subjektiv* sind. Diese Sichtweise ist eine epistemologische Überzeugung, die dem Curriculum zugrunde liegt. Solche epistemologischen Überzeugungen bestimmen auch, welches Weltverhältnis und Selbstkonzept die Lernenden durch den Unterricht aufbauen. Diese rein qualitative, aber durchaus entscheidende Ebene des Lernprozesses soll unter bestimmten Kategorien dokumentiert und charakterisiert werden. Thematisch schließt sich darüber der Kreis zu den bereits in Kapitel 2, zu Beginn dieser Arbeit aufgerissenen epistemologischen Gesichtspunkten. -

Den methodischen Rahmen für die Untersuchungen dieses ersten Punktes bildet also die Dokumentation von Schüleräußerungen, welche im Unterrichtsgespräch, im Rahmen eines Interviews nach der Unterrichtseinheit, in einer Klausur und bei der Bearbeitung eines Fragebogens formuliert werden. Damit kommen sowohl Äußerungen zum Tragen, die in der Unmittelbarkeit des Unterrichtsgesprächs (spontan) getätigt werden, als auch solche, die mit retrospektivem Abstand verbalisiert werden. Entsprechend den obigen Ausführungen bietet sich deren Ordnung unter folgenden Kategorien an:

1. *Verständnisebene des Kerncurriculums*
2. *Übergang zu abstrakten Ordnungselementen*
3. *Modellrezeption*
4. *Geschlossenheit der Physik*

6.2.2 2. Ziel: Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses

Die Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses zielt darauf ab,

- Besonderheiten der Unterrichtspraxis und insbesondere die Schülerrezeption der Unterrichtsinhalte zu dokumentieren; das schließt die Fixierung von Verständnisschwierigkeiten mit ein.
- den Lernerfolg zu überprüfen.
- zu verfolgen, inwiefern der Unterricht zur Beugung die Wissensbasis zur optischen Abbildung und zum Sehen verändert.
- Rückmeldungen über die Akzeptanz des Unterrichtsverlaufes und Unterrichtskonzeptes zu bekommen.

Die Besonderheiten der Unterrichtspraxis und der Schülerrezeption der Unterrichtsinhalte werden, wie schon bei der Charakterisierung epistemologischer Überzeugungen, durch Schüleräußerungen erhoben, welche die Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Unterrichtsgesprächs und der Klausur formulieren. Diese Erhebung schließt die Fragestellung mit ein, inwiefern der Unterricht zur Beugung die Wissensbasis zur optischen Abbildung und zum Sehen verändert. Außerdem stellt die Klausur (Anhang A) neben den mündlichen Leistungen der Schülerinnen und Schüler ein geeignetes Mittel dar, den Lernerfolg zu überprüfen. Auf beide Möglichkeiten soll hier zurückgegriffen werden.

Zusätzlich wird die Schülerrezeption der Unterrichtsinhalte über einen Fragenkomplex innerhalb eines Fragebogens (Anhang B) erhoben, bei dem die Schülerinnen und Schüler auf einer fünfstufigen Skala Fragen zu den Unterrichtsinhalten zu beantworten haben (Fragen 1-9). Nach einer ersten Frage zum Interesse wird dort die Anschaulichkeit der Inhalte zum Spiegel, zur Hebung, zur Linse (Frage 2) und zur Beugung erhoben (Frage 3). Es schließen sich Fragen an, welche die Relevanz für das Verständnis und die Erklärungsmächtigkeit der durch das Curriculum eingeführten Begriffe ermitteln. Durch diese Fragen wird demnach die Wissensbasis charakterisiert (Fragen 4-7). Schließlich wird - als weitere Frage zur Wissensbasis - auch noch erhoben, inwiefern die ausgiebige Behandlung der Beugung hilft, die Quantentheorie physikalisch einzuordnen (Frage 8).

Die Rückmeldungen über die Akzeptanz des Unterrichtsverlaufes und des Unterrichtskonzeptes werden mittels des zweiten Teiles des Fragebogens festgestellt. Neben der Frage, ob ihnen der Unterricht gefallen habe, wird dabei sowohl das Erleben des eigenen Kompeten-

zuwachsen (Fragen 12 und 16) als auch die Beurteilung des Unterrichtsablaufes einschließlich der Rolle der Experimente und des Zusammenhangs von Experiment und Erklärung (Frage 15) ermittelt. Einige dieser Fragen sind der Arbeit einer Zweiten Staatsprüfung (GRANT 1995, S. 40) zum Zeigerformalismus in der Optik entnommen.

6.3 Abschließende Erprobung – Probandengruppe

Die abschließende Erprobung des Kerncurriculums und einiger Erweiterungsmodule erfolgte an der Freien Waldorfschule Kassel zu Beginn des Schuljahres 2004/2005 im Leistungskurs Physik der 13. Klasse. Den Leistungskurs Physik besuchten sieben Schüler. Alle Schüler hatten ihren gesamten naturwissenschaftlichen Unterricht an einer Waldorfschule durchlaufen. Insbesondere waren sie im Rahmen ihres Physikunterrichtes in Optik nach dem Curriculum „Modellfreie Optik“ von MACKENSEN und OHLENDORF unterrichtet worden. Damit hatten sie in der 12. Klasse eine Unterrichtsreihe zur Optik, wie sie in Kapitel 3.1 dargestellt ist, besucht.

Sämtliche Schüler des Leistungskurses absolvierten parallel zur gymnasialen Oberstufe eine Berufsausbildung: vier Schüler zum Industrieelektroniker, zwei zum Industriemechaniker und einer zum Tischler. Die Doppelqualifikation bedeutete für diese Schüler, dass sie in 14 Schuljahren sowohl das Abitur als auch die Berufsausbildung abschließen konnten.

Zwei der Schüler hatten nach der 12. Klasse zunächst ihre Berufsausbildung im Schuljahr 2003/2004 beendet und deshalb während dieses Schuljahres nicht an den Kursen der gymnasialen Oberstufe teilgenommen. Folglich besuchten sie im Schuljahr 2004/2005 in ihrem 14. Schuljahr den Physik Leistungskurs der 13. Klasse. - Nicht zuletzt ging die geringe Schülerzahl des Leistungskurses darauf zurück, dass einige Schüler, die im Schuljahr 2003/2004 den Leistungskurs Physik der 12. Klasse besucht hatten, während des Schuljahres 2004/2005 zuerst die Berufsausbildung abschlossen und damit für ein Jahr den Kursunterricht der gymnasialen Oberstufe unterbrachen. Die Waldorfschule Kassel nimmt zu Gunsten der Doppelqualifikation von Berufsausbildung und Abitur schwankende und ggf. auch geringe Schülerzahlen in ihren Grund- und Leistungskursen während der Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe in Kauf.

Das Leistungsniveau und die Leistungsbereitschaft der Lerngruppe waren überdurchschnittlich hoch. Auch die beiden Schüler, welche für ein Jahr den Kursunterricht der gymnasialen Oberstufe unterbrochen hatten, konnten auf ein solides Vorwissen aufbauen. Fast alle Schüler waren algebraisch sicher und überblickten geometrische Strukturen schnell, formulierten aber physikalische Inhalte nicht durchgängig sauber in der Fachsprache¹⁰. Hier lag ein Übungsschwerpunkt im Unterricht.

6.4 Abschließende Erprobung - Ergebnisse

6.4.1 Übersicht über die Abfolge der Unterrichtsinhalte

Die Abfolge der Unterrichtsinhalte gliederte sich in drei Phasen: In der ersten Phase wurden die optischen Wege eingeführt und das Spiegelgesetz, das Brechungsgesetz und die optische Abbildung im Konzept optischer Wege wiederholt. Das Kerncurriculum zur Beugung schloss sich in der zweiten Phase an. Schließlich folgten aus den Erweiterungsmodulen einige Unterrichtsinhalte im Rahmen der dritten Phase.

Nachfolgend sind die Unterrichtsinhalte aller drei Phasen im Einzelnen aufgeführt. Die nebenstehenden Verlaufspfeile markieren die aufeinanderfolgenden Doppelstunden, während derer die jeweiligen Themen behandelt wurden.

1. Phase: Einführung der optischen Wege, Spiegel, Brechung, optische Abbildung.

- Operationale Definition des optischen Weges
- Anwendung der operationalen Definition des optischen Weges auf die Spiegelercheinungen: Aus der einfachen Formulierung des Spiegelgesetzes, dass die Dinge im Spiegelraum den Dingen im Raum vor dem Spiegel senkrecht zur Ebene des durchblickten Spiegels gegenüber liegen, folgt für die optischen Wege das Gesetz von gleichem Einfallswinkel und Ausfallswinkel (1. und 2. Erklärungsweg).
- Anwendung des FERMAT-Prinzips in seiner räumlichen Form auf die Spiegelercheinungen

¹⁰ Die Schwierigkeit der Schüler lag weniger darin, dass sie umgangssprachliche Worte an die Stelle der korrekten fachlichen Terminologie setzten. Vielmehr war die Formulierung teilweise in sich unlogisch oder so bruchstückhaft, dass es an der notwendigen Exaktheit fehlte. Von daher handelte es sich mehr um ein generelles sprachliches Problem als um ein auf die Fachsprache begrenztes Defizit.

gen (3. Erklärungsweg). Übungsaufgaben, bei denen über das FERMAT-Prinzip die Abknickstelle der optischen Wege am Spiegel berechnet wurde.

- Vergleich der drei Erklärungswege, die am Spiegel beschriftet wurden.
- Die Brechung im Konzept optischer Wege. Äquivalenz von $n = \frac{t}{s}$ und $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ (Kapitel 3.1.3). Anwendung des FERMAT-Prinzips in seiner räumlichen Form auf Hebungerscheinungen.
- Das Prisma im Konzept optischer Wege als Anwendungsaufgabe des Brechungsgesetzes. Freihandexperimente und Gruppenarbeit der Schüler.
- Erklärung der Linsenabbildung im Konzept optischer Wege anhand des Versuches 3 in Kapitel 4.3.2. Analyse der optischen Weglängen bei der Linsenabbildung.
- Herleitung der Linsengleichung.

2. Phase: Kerncurriculum zur Beugung.

- Freihandversuche zur Beugung: erste und zweite Versuchsreihe aus Kapitel 4.1.
- Erarbeitung qualitativer Zusammenhänge, die sich aus den beiden Versuchsreihen zur Beugung ergeben. Übergang zum abgelösten Versuch für die Beugung am Gitter. Herleitung der beiden Bedingungen, welche dort an die optischen Wege gestellt werden müssen. Ableitung der Formeln $\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{g}$ und $\tan \alpha_n = \frac{d_n}{f}$.
- Besprechung von Aufgaben zur Beugung am Gitter.
- Versuche zum Zusammenhang zwischen Beugungs- und Abbild. Rückblick auf die optische Abbildung unter Einbeziehung des Wissens zur Beugung.
- Kontextuale Abbildung.

3. Phase: Erweiterungsmodule zum Kerncurriculum.

- Einführung der Zeiger am Doppelspalt.
- Vergleich von Zeigerformalismus und Wellenmodell am Doppelspalt
- Einführung des Quantenobjektes Photon. Verbindung von Intensitäts- und Wahrscheinlichkeitsfunktion.
- Darstellung von Welcher-Weg-Experimenten am Doppelspalt.



- Besprechung des Unterschiedes von einer Physik der Objekte und einer Physik der Beziehungen.
- Besprechung des Intensitätsverlaufes des Einzelspaltens im Zeigerformalismus. Anwendung der Begriffe „Gesamtheit“ und „Unbestimmtheit“ aus der Quantentheorie auf den Einzelspalt.
- Zusammenhang von Gitterbeugung und Beugung am Einzelspalt.
- Experiment zu Rotationen des Gitters
- Ableitung des Gitterkegels und der LAUE-Kegel aus den Bedingungen, welche für die Beugung am Gitter an die optischen Wege gestellt werden müssen.
- LAUE-Kegel in der Röntgenstrukturanalyse von Kristallen. Das Atom als Streuzentrum im Kristall. Atome in Beugungsexperimenten als Quantenobjekte.
- Vergleich verschiedener Erklärungswege in Bezug auf das Beugungsbild bei Rotationen des Gitters: Erklärung im Konzept optischer Wege, Erklärung im Wellenmodell, Erklärung im Rahmen der Quantentheorie.
- Versuch zur Interferenz durch Reflexion an einer Glimmerplatte.

In der 13. Doppelstunde wurde der Stoff der Unterrichtsreihe zur Vorbereitung auf die Klausur nochmals in Aspekten wiederholt, in der 14. Doppelstunde die Klausur geschrieben. Alle vierzehn Doppelstunden lagen in einer Blockunterrichtsphase des Leistungskurses; d.h. die Schüler hatten täglich in ihren ersten beiden Schulstunden Physikunterricht.

6.4.2 Dokumentation der epistemologischen Überzeugungen

Im Folgenden sollen unter den in Kapitel 6.2.1 erläuterten Kategorien Schüleräußerungen referiert werden, welche im Rahmen des Unterrichtes, in Interviews im unmittelbaren Anschluss an die Unterrichtsreihe und in der Klausur getätigt wurden. - In diese Dokumentation fließen auch Äußerungen aus dem Beginn der Unterrichtsreihe ein, in der zunächst optische Grundlagen wiederholt und dann im Konzept optischer Wege formuliert wurden. Diese Äußerungen sind hier mit aufgenommen worden, da sich in ihnen die Rezeption des Begriffes optischer Weg widerspiegelt.

Selbstverständlich stellen die hier aufgeführten Äußerungen eine Auswahl dar. So wurde darauf verzichtet, Äußerungen aus Unterrichtsgesprächen zu dokumentieren, in denen aufgrund



der Begabungsstreuung innerhalb der Lerngruppe oder durch Unsicherheiten in der Fachsprache sorgfältige Begriffsklärungen notwendig wurden. Entsprechende Unterrichtssequenzen treten in jeder heterogenen Schülergruppierung auf, sobald ein gewisses Niveau an Präzision verlangt wird. Leitender Gesichtspunkt für die Auswahl war vielmehr, solche Äußerungen wiederzugeben, welche das metakonzeptionelle Bewusstsein der Schüler widerspiegeln. In solchen Äußerungen werden epistemologische Gesichtspunkte explizit formuliert. Damit treten dort auch epistemologische Überzeugungen deutlich zu Tage.

Nicht für alle der nachfolgenden Kategorien waren Schüleräußerungen im Unterrichtsgespräch, in Interviews und in der Klausur wesentlich, mal stehen die Ergebnisse der einen, mal der anderen Erhebungsart im Vordergrund. Die Reihenfolge folgt dem zeitlichen Ablauf; zunächst sind die Äußerungen im Unterrichtsgespräch, dann in Interviews und schließlich in der Klausur aufgeführt.

Verständnisebene des Kerncurriculums

- **2. Doppelstunde:** Es wurde verlangt, die drei am Spiegel beschrifteten Erklärungswege zu vergleichen (Kapitel 6.4.1). Mehrere Antworten der Schüler stellten heraus: einmal ginge man von sich selber, von seiner Wahrnehmung aus (1. Erklärungsweg), dann experimentiere man richtig (2. Erklärungsweg) und mit der Anwendung des FERMAT-Prinzips denke man mathematisch, irgendwie abstrakt.
- **3. Doppelstunde:** Auf die direkte Frage, was ein optischer Weg sei, im Rahmen eines Reproduktion und Reorganisation übenden Lehrer-Schüler-Gesprächs verbalisierten die Schüler zunächst ihre Unsicherheit, sie würden nicht wissen, auf was die Frage abziele. Eine erneute Erläuterung der Frage brachte dann die Antwort, dass man ohne einen Versuch das gar nicht sagen könne. Wenn man den Versuch kenne, könne man aber auch den Verlauf von optischen Wegen angeben.
- **6. Doppelstunde:** Nachdem die beiden Versuchsreihen in Form von Freihandversuchen im Unterrichtsgespräch qualitativ geordnet waren, bemerkte ein Schüler, dass er die Zusammenhänge der Versuche wunderbar nachvollziehen könne, es aber für ihn nicht wirklich zu fassen sei, warum sich Ansichten vervielfachten, wenn man kleine, regelmäßige Strukturen in das Blickfeld halte. Er habe erwartet, dass die Ansicht dann lediglich sich abdunkle.

Nachdem im Anschluss die Beugung am Gitter im Konzept optischer Wege besprochen war, bemerkte dieser von sich aus, seiner schon geäußerten Verwunderung entspreche jetzt die Tatsache, dass optische Wege abknickten.

- **Interview:** Frage: „Während der drei Wochen mit dem Thema Optik haben wir fast nicht von Licht gesprochen - Auf was haben wir unser Verständnis gegründet?“

Ein Schüler nahm gleich Bezug auf die Versuche beim Spiegel, wo über Schattengrenzen und Fluchten die optischen Wege definiert wurden: Anhand der optischen Wege „haben wir eigentlich die ganzen optischen Phänomene erklärt“.

Ein anderer Schüler: „Wir haben das Licht durch optische Wege ersetzt und sind so geometrisch an die ganzen Sachen herangegangen.“

- **Klausur:** In Aufgabe 2, Teilaufgabe 1 wurde verlangt (Anhang B), den Versuchsaufbau zu erläutern, wie er in *Abbildung 15* des Kapitels 4.3.1 wiedergegeben ist. Einer der sieben Schüler erläuterte den Aufbau wie folgt:

„Um das Gitter mit parallelem Licht zu durchleuchten, dieses also mittels L_2 wieder in einem Punkt bündeln zu können, stellt man die Halogenlampe in den Brennpunkt von L_1 ; das Licht verläuft danach parallel. Mit dem Schirm im Brennpunkt von L_2 bekommt man gebündelte Beugungsbilder“.

Übergang zu abstrakten Ordnungselementen

- **8. Doppelstunde:** Bei der Einführung der Zeiger am Doppelspalt wurde zunächst der Intensitätsverlauf mittels der Vektoraddition zweier Zeiger dargestellt, bei denen einer um die Spitze des anderen rotiert. Danach wurde der Verlauf der optischen Wege für ein Minimum im Intensitätsverlauf verfolgt ($\delta_n = \frac{n}{2} \cdot \lambda$). An dieser Stelle meldete sich ein Schüler und bemerkte, man könne hier gar nicht mehr von optischen Wegen streng genommen sprechen, da es an dieser Stelle nicht hell sei und so weder die Definition über die Schattengrenze noch über die gesehenen Fluchten wirklich anwendbar sei.
- **9. Doppelstunde:** Als die Darstellung der 8. Doppelstunde aufgegriffen wurde (siehe vorangehender Punkt) unter der Fragestellung, ob die Definition des optischen Weges hier noch tragfähig sei, bemerkten die Schüler, wenn man den optischen Weg nur als geometrischen Weg verstünde, wären die Ungereimtheiten bei der Zuordnung zu den Minima des Beugungsbildes nicht mehr problematisch. So bliebe der Weg ein geometrisches

Ordnungselement; die Definition über die Schattengrenze trüge allerdings bei den Minima des Beugungsbildes nicht mehr wirklich.

Modellrezeption

- **Interview:** Auf die Frage, wie die Epoche wohl verlaufen wäre, wenn man alles im Wellenmodell erklärt hätte, wurde Folgendes erwidert:
 - Die Zeiger hätte man gut aus der Amplitude bekommen können, aber der Sprung zur Quantentheorie wäre dann noch krasser gewesen, man hätte einen „Knoten ins Hirn“ bekommen.
 - Bei dem Wellenmodell hätte man es die ganze Zeit mit „Vorstellungen“ zu tun gehabt, man hätte sich Wasserwellen beispielsweise vorgestellt. Man wäre dann zwar zum Zeiger gekommen, hätte aber so richtig „mathematisch-theoretisch“ die Inhalte schwer beschreiben können.
 - Der Sprung zum Abstrakten der Quantentheorie wäre noch größer gewesen.

Geschlossenheit der Physik

- **Interview:** Frage: „Während der drei Wochen mit dem Thema Optik haben wir fast nicht von Licht gesprochen - Auf was haben wir unser Verständnis gegründet?“
Der Schüler, der zunächst meinte, man habe das Licht durch optische Wege ersetzt (siehe oben) ergänzte, man habe gesehen, dass sich die optischen Wege durch alle Versuche durchzögen - bei der Hebung, Linse und Beugung immer mit kleinen Abänderungen, aber im Prinzip zögen sie sich durch alles durch.
- **Interview:** Frage: „Wie haben sich im Laufe der Epoche zur Quantentheorie hin die Erklärungswege abgewandelt?“
 - Die optischen Wege würden nur noch Möglichkeiten beschreiben, am Anfang wären es Schattengrenzen gewesen.
 - Als man bei der Quantenphysik angekommen wäre, habe man die ganzen vorher abgelaufenen Versuche wieder erklären können.
- **Interview:** Frage: „Würden Sie jetzt im Rückblick sagen, die Optik habe Ihnen geholfen die Quantentheorie zu verstehen?“. Ein Schüler meinte, die Quantentheorie habe erst einmal seinen Blick für die Optik durcheinander gebracht - aber im Ganzen wohl schon,

um den Blick für das Ganze zu bekommen. Die Quantentheorie wäre aber schon irgendwie „unglaublich“ gewesen.

- **Klausur:** In Aufgabe 2, Teilaufgabe 8, galt es, den Zusammenhang zwischen den Bedingungen für eine eindeutige optische Abbildung und den Aussagen der Quantentheorie darzustellen. Dabei musste auf Teilaufgabe 7 Bezug genommen werden (Anhang B). Zwei der Schülerantworten seien im Folgenden aufgeführt:

- „Die Aussage der Quantentheorie ist, dass der Weg der Quanten nicht bestimmt ist. Man kann nur die Wahrscheinlichkeit für das Antreffen eines Leuchtereignisses berechnen. Wenn die möglichen Wege des Quants eingeschränkt werden, z. B. durch ein Gitter, dann beeinflusst das das Abbild, es entstehen Beugungsbilder. Man kann sagen, wenn der Weg unbestimmt bleibt, ist das Abbild bestimmt, wenn der Weg bestimmt ist (durch Einschränkungen) ergibt sich eine Unbestimmtheit beim Abbild, es entstehen die Beugungserscheinungen.“ (Antwort auf Teilaufgabe 8).

- „Wenn man kein Gitter verwendet, würde man einen sehr hellen Fleck in dem Brennpunkt der Linse sehen. Man braucht also eine regelmäßige Struktur, um ein Beugungsbild zu erzeugen. Denn durch das Gitter wird die Weite, die vorher dort geherrscht hat, stark eingeschränkt und dadurch entsteht auf dem Schirm Weite. Es wird also, wie eben schon beschrieben, für ein eindeutiges optisches Bild genügend Weite gefordert. Hier sieht man deutlich, dass es in der Physik sich gegenseitig ausschließende Beobachtungsbedingungen gibt, bei denen, wenn man die eine anwendet, nur ein bestimmtes Ergebnis möglich ist.“ (Antwort auf Teilaufgabe 7).

„In der Quantentheorie wird das Prinzip sich ausschließender Beobachtungsbedingungen noch mehr deutlich. Wenn man nur das Ergebnis einer Doppelspaltinterferenz betrachtet, erhält man das Ergebnis eines Doppelspalt. Wenn man jedoch mit einem Welcher-Weg-Detektor die Sache betrachtet, erhält man das Ergebnis des Einzelspalt.“ (Antwort auf Teilaufgabe 8).

6.4.3 Dokumentation des Lernzuwachses und Verständnisprozesses

Im Folgenden ist zunächst dokumentiert, welche Besonderheiten im Verständnisprozess der Schüler auftraten, als das Kerncurriculum und einige Inhalte aus den Erweiterungsmodulen

behandelt wurden. Es schließen sich eine Auswertung des Fragebogens und der Ergebnisse aus der Klausur bzw. der mündlichen Mitarbeit an.

Die hier dokumentierten Verständnisschwierigkeiten betreffen Inhalte, die im Zentrum der didaktischen Reduktion für die jeweilige Unterrichtsstunde standen.

Besonderheiten im Verständnisprozess

- **3. Doppelstunde:** Bei der Ableitung des Brechungsgesetzes aus dem FERMAT-Prinzip gab es zunächst Fragen, wo der optische Wegabschnitt, welcher mit der Brechzahl n multipliziert werde, verlaufe. Es musste deutlich hervorgehoben werden, dass die optische Weglänge nicht mehr mit der geometrischen übereinstimmt und die *Weglängen Zahlen* sind, die man einem Weg bzw. dem Verlauf eines Weges zuordnet: Die benachbarten Wegen nach einer bestimmten Vorschrift zugeordneten Zahlen werden im FERMAT-Prinzip verglichen.
- **6. Doppelstunde:** Die qualitative Ordnung der Versuchsreihen zur Beugung war den Schülern selbständig möglich.
- **7. Doppelstunde:** Die Tatsache, dass die Linsenbegrenzung selbst wie eine Lochblende wirkt und man folglich berücksichtigen muss, welche Beugungserscheinungen dadurch hervorgerufen werden, wirkte für die Schüler zunächst fremd. Erst eine stufenweise Verfolgung der Beugungsbilder von Blenden kleiner Öffnung zu Blenden großer Öffnung brachte hier die notwendige Klarheit.
- **11. Doppelstunde:** Bei der Behandlung der Beugungserscheinungen unter Rotationen des Gitters fiel es den Schülern leicht, die Lage des Gitterkegels zu verstehen. Unterstützt durch eine Vorstellungsübung analog zur Schülervorlesung (Kapitel 6.1.2) konnten sie sich diesen mit nur kleinen Hilfestellungen selbst herleiten. Die LAUE-Kegel waren hingegen für sie deutlich schwerer zu verstehen. Hier hatten sie sich so an einen Verlauf von optischen Wegen in einer Ebene senkrecht zu den Gitterstegen gewöhnt, dass es für sie lange befremdlich war, diesen Verlauf in Frage zu stellen.

Auswertung des Fragebogens

Die Schülersicht in ihrem Zusammenhang zum Lernzuwachs und Verständnisprozess ist auch dem Fragebogen zu entnehmen, welchen die Schüler im Anschluss an die Unterrichtsreihe

bearbeiteten (Anhang A). *Abbildung 35* gibt die Auswertung des Fragebogens wieder. Dabei sind für jede Frage die Verteilung der Antworten zwischen voller Zustimmung und voller Ablehnung dokumentiert. Die Auswertung unterscheidet zwischen Fragen zur Schülerrezeption der Unterrichtsinhalte und Fragen zur Akzeptanz des Unterrichtsverlaufes (Kapitel 6.2.2). Besonders markant fällt im Rahmen der Auswertung auf, dass die Verteilung der Antworten nur eine geringe Streubreite aufweist und eindeutig die Zustimmung bzw. volle Zustimmung zu den positiv formulierten Aussagen dominiert. Damit kann von einer rundum positiven Re-

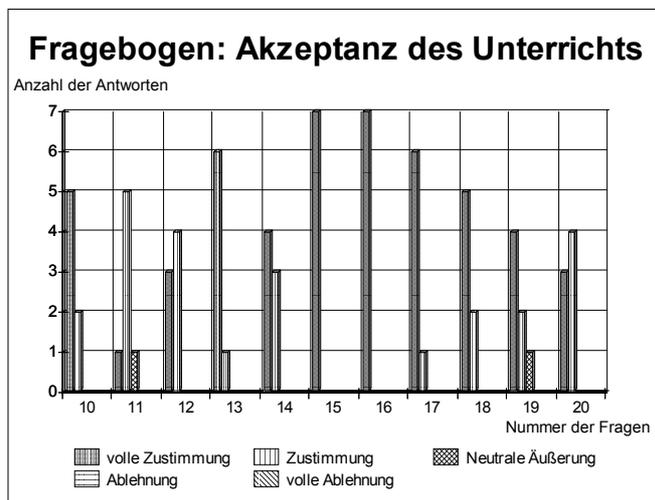
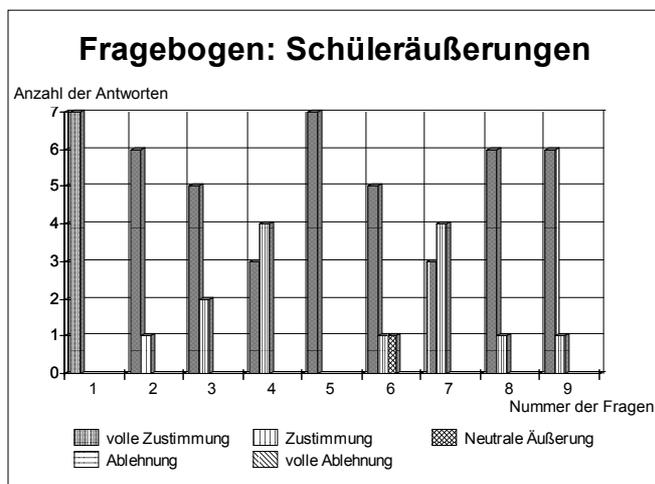


Abb. 35:

Ergebnisse des Fragebogens zum Unterricht (Anhang B) im Rahmen der abschließenden Erprobung des Curriculums. Die Fragen 1-9 ermittelten die Schülerrezeption der Unterrichtsinhalte, die Fragen 10 - 20 die Akzeptanz des Unterrichts.

zeption des Curriculums (Anschaulichkeit, Erklärungsmächtigkeit der eingeführten Begriffe, Vorbereitung auf die Quantentheorie usw., siehe auch Kapitel 6.2.2) und einer hohen Akzeptanz des Unterrichtsverlaufes ausgegangen werden. - Unterstützt wird diese Aussage nicht zuletzt durch die Antworten auf Frage 1, bei der alle Schüler der Aussage voll zustimmten, der Stoff der Physikepoche sei interessant gewesen.

Bei den Fragen 15 und 16 stimmten ebenfalls alle Schüler den Äußerungen voll zu, dass die Experimente und die im Unterricht daran entwickelten Erklärungen unmittelbar zusammengehörten bzw. dass im Vergleich mit anderen Unterrichten sie die Erklärungen des Physikunterrichtes voll auf zufriedenstellten. Damit liegt gemäß der Schülersicht eine hohe Kohärenz von Experiment und Erklärung vor, wie auch die emotionale Akzeptanz des

Erklärungsweges auf Grundlage des Konzeptes optischer Wege im Vergleich zu anderen Unterrichten als hoch einzustufen ist. -

Auf eine weitere Präsentation einzelner Antworten wird hier verzichtet, da die generell positive Rückmeldung dominiert. Die Anzahl der Probanden lässt außerdem keine statistische Auswertung sinnvoll erscheinen.

Ergebnisse der Klausur und mündlichen Mitarbeit

Die Klausur, welche die Schüler am Ende der Unterrichtseinheit schrieben (Anhang A), und die Ergebnisse aus der mündlichen Mitarbeit spiegeln das generell hohe Leistungsniveau und den Lernerfolg der Lerngruppe wider:

Mit einem Schnitt von 12,1 Punkten haben die Schüler durchschnittlich etwas über 80% der möglichen Punkte erreicht. Dabei streuten die Einzelergebnisse zwischen 9 und 14 Punkten.

Bei der Bewertung der mündlichen Mitarbeit lag der Schnitt bei 12,3 Punkten. Allerdings war die Kongruenz zwischen mündlichen und schriftlichen Ergebnissen nur mäßig. Hier differierten die Ergebnisse um bis zu 4 Punkte. Dies entsprach unterschiedlich großen Fortschritten im Umgang mit der Fachsprache während der Unterrichtseinheit.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass ein hoher Lernerfolg vorliegt und die Wissensbasis zur Optik deutlich erweitert wurde.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Dokumentationen der epistemologischen Überzeugungen und des Verständnisprozesses geht deutlich hervor, dass die optischen Wege ein sehr wichtiges, wenn nicht sogar das zentrale Strukturmerkmal darstellen, um welches sich die Wissensbasis der Schüler vernetzt und auf welches der Verständnisprozess rekurriert.

So bemerkte ein Schüler: „Wir haben das Licht durch optische Wege ersetzt und sind so geometrisch an die ganzen Sachen herangegangen“. Ein anderer Schüler weist auf deren Definition mittels Schattengrenzen und Fluchten hin und führt dann aus, dass sich darauf die ganze Erklärung der optischen Phänomene gegründet habe. An die Stelle einer Lichtvorstellung tritt also ein experimenteller Eingriff, der ein Ergebnis im Versuch zur Folge hat, welches sich

geometrisch fassen lässt. Dabei wird den Schülern deutlich, dass man mittels der Geometrie eine Fülle optischer Phänomene einheitlich beschreiben kann und so einen verständnisvollen Überblick bekommt.

Aus der Beantwortung des Fragebogens geht zusätzlich hervor, dass die Verbindung von experimenteller Erscheinung und deren geometrischer Formulierung von den Schülern als sehr schlüssig empfunden wurde. Im Unterrichtsgespräch wurde auch die Frage, was ein optischer Weg sei, als nur sinnvoll angesehen, wenn man gleichzeitig auf ein Experiment Bezug nehme. Für die Schüler steht damit der Begriff des optischen Weges in unmittelbarer Nähe zur Erscheinung. Auf dem Hintergrund des von WAGENSCHNEIDER charakterisierten wissenschaftlichen Vorgehens (Kapitel 2.2) ist besonders interessant, dass den Schülern bei der Einführung der optischen Wege am Spiegel eine Abstufung von Wahrnehmung, „richtigem Experimentieren“ und „irgendwie mathematisch-abstraktem Vorgehen“ bewusst wird. Die Abstufung WAGENSCHNEIDERS vom Schauen über das sachliche Sehen hin zum planvollen Sehen findet sich hier wieder, wird aber auf dem Hintergrund des FERMAT-Prinzips hin zu einem abstrakten Vorgehen erweitert. Interessant in diesem Zusammenhang sind nicht zuletzt die Einwände, welche von den Schülern bei der Einführung der Zeiger vorgebracht wurden, dass man nämlich von einem optischen Weg an einer Dunkelstelle des Beugungsbildes am Doppelspalt strenggenommen nicht sprechen dürfe. Hier wurde den Schülern der Übergang von der operationalen Definition der optischen Wege über das Experiment hin zu deren abstrakten, geometrischen Verwendung besonders deutlich.

Obwohl die optischen Wege von den Schülern in hoher Nähe zur Erscheinung gefasst wurden, erlebten sie diese gleichzeitig als eine große Hilfestellung im Übergang zur Abstraktion der Quantentheorie. Ein Schüler bemerkte, man sei über die optischen Wege „so richtig mathematisch-theoretisch“ vorgegangen. Damit stellen die optischen Wege ein Strukturmerkmal dar, welches sich im Übergang vom Experiment zur abstrakten Formulierung zwar abwandelt, aber trotzdem tragfähig bleibt und gerade das Neue der Abstraktion im Kontrast zur Erscheinung des Experimentes verdeutlicht. Insbesondere der Verzicht auf das Wellenmodell zu Beginn der Unterrichtsreihe habe, so ein Schüler, diesen Übergang in seinem Kontrast verdeutlicht.

Die hohe Erklärungsmächtigkeit und zentrale Stellung der optischen Wege im Zusammenhang des hier vorgestellten Curriculums geht vom fachinhaltlichen Gesichtspunkt aus im Wesentli-

chen auf das FERMAT-Prinzip zurück. Schon WEBER hat für das Lichtwegkonzept, welches sich ebenfalls auf das FERMAT-Prinzip gründet, ausgeführt (WEBER 2003, S. 278), dass sowohl die dort vorhandene Bereitstellung abstrakter Lerninhalte und tragfähiger Begriffe als auch das Wecken eines Bewusstseins für Zusammenhänge zwischen Teilinhalten des Unterrichtes zur Förderung kumulativer Lernprozesse geeignet erscheinen. Diese Feststellung WEBERS kann durch die vorliegende Arbeit unterstützt werden.

Im Gegensatz zum Lichtwegkonzept wird hier das FERMAT-Prinzip ohne eine Lichtvorstellung als rein geometrisches Ordnungselement verwendet. Dadurch kann die Idee FERMATS, die tatsächliche Beobachtung durch den Vergleich mit denkbaren, möglichen Erscheinungen zu bestimmen, für die Beugung aufgegriffen und erweitert werden. Auf der Idee dieser Erweiterung beruht nicht zuletzt der gesamte Aufbau des Kerncurriculums - und im Hinblick auf kumulative Lernprozesse scheint sich diese Erweiterung zu bewähren. Die Vorteile des FERMAT-Prinzips kommen bei der Ausbildung der Wissensbasis weiterhin voll zum Tragen. Auch treten so Zusammenhänge zwischen Teilinhalten des Unterrichtes den Schülern deutlich ins Bewusstsein. *Die operationale Definition der optischen Wege und die Formulierung von Kriterien an diese optischen Wege zur Beschreibung der Beugung ermöglichen es, durch tragfähige Begriffe bei den Schülern ein Bewusstsein für Zusammenhänge zwischen Teilinhalten des Unterrichtes zu wecken und die Beugung in eine Fülle optischer Erscheinungen zu integrieren. Der Übergang vom Experiment zu abstrakten Lerninhalten wird deutlich und erzeugt ein hohes Methodenbewusstsein.*

Dem Gesagten widerspricht nicht, dass, nach der Behandlung von Modellvorstellungen zum Licht, einzelne Schüler an die Stelle von optischen Wegen Lichtstrahlen setzten. Im Rahmen der Klausur ist ein Schüler entsprechend vorgegangen. Hieraus lässt sich lediglich auf die zentrale Stellung der Umgangssprache schließen und gleichzeitig die formale Kongruenz von optischen Wegen und Lichtstrahlen ableiten. Eine emotionale Disposition, gemäß der nur als verstanden gilt, was man auf anschauliche Modelle (hier: Lichtmodelle) zurückführt, folgt hingegen nicht.

Mit der Äußerung eines Schülers, man habe, als der Unterricht bei der Quantenphysik angekommen wäre, die ganzen vorher abgelaufenen Versuche wieder erklären können, zeigt neben vielen anderen Stellungnahmen auf, dass die Schüler den Unterricht zur Optik und Quanten-

physik in einem geschlossenen Rahmen erlebten. Diese Äußerung wird allerdings aus der Distanz der Retrospektive getroffen, im Lernprozess selbst hatten die holistischen Aspekte der Quantentheorie durchaus etwas „Unglaubliches“, um die Wortwahl eines Schülers aufzugreifen.

Inwiefern die Behandlung der Beugung half, diese Brücke zu schlagen, geht aus Antworten hervor, die im Rahmen der Klausur zur optischen Abbildung gegeben wurden. Eine zentrale Äußerung sei hier nochmals angeführt: „Wenn man kein Gitter verwendet, würde man einen sehr hellen Fleck in dem Brennpunkt der Linse sehen. Man braucht also eine regelmäßige Struktur, um ein Beugungsbild zu erzeugen. Denn durch das Gitter wird die Weite, die vorher dort geherrscht hat, stark eingeschränkt und dadurch entsteht auf dem Schirm Weite. Es wird also, wie eben schon beschrieben, für ein eindeutiges optisches Bild genügend Weite gefordert. Hier sieht man deutlich, dass es in der Physik sich gegenseitig ausschließende Beobachtungsbedingungen gibt, bei denen, wenn man die eine anwendet, nur ein bestimmtes Ergebnis möglich ist.“

Der Schüler bezieht sich auf einen Versuch des Kerncurriculums. Im Vergleich von den Versuchsaufbauten zur optischen Abbildung und für Beugungserscheinungen am Gitter erkennt er eine Geste: die der Weite. Die Weite ist auf verschiedene Arten beiden Versuchen immanent. Sie zeigt sich in komplementärer Art. Der Schüler erkennt also die Idee der Komplementarität in einem makroskopischen Kontext. Er sieht, wie einzelne, unterschiedliche experimentelle Eingriffe in *einen* Versuchsaufbau auf komplementäre Weise der Gesamtheit des Versuchsaufbaus Rechnung tragen. Das ist eine Denkform, zu der er bei der Behandlung von Welcher-Weg-Experimenten ebenfalls genötigt ist. Er lernt diese Denkform oder Kategorie dort aber nicht erstmalig kennen, vielmehr ist sie ihm schon zuvor in einem Zusammenhang begegnet, der seiner Beobachtung zugänglich ist. - Um solche Zusammenhänge aber aus Beobachtungen heraus fassen zu können, bedarf es eines gewissen Überblickes über Erscheinungsreihen. Der Umgang mit Erscheinungsreihen stand für diesen Schüler am Anfang seines Unterrichtes zur Beugung. So liegt die Vermutung nahe, dass der phänomenologische Ansatz des Curriculums den erkennenden Umgang mit Erscheinungsreihen auch so förderte, dass dem makroskopischen Rahmen des Versuchs eine Geste, die der Weite, entnommen werden konnte. Damit wurde die Rezeption der Komplementarität gefördert.

Die Gedankenform der Komplementarität lernen die Schüler schon in den Beugungsversuchen des Kerncurriculums in einem ihnen zugänglichen experimentellen Rahmen kennen. Holistische Aspekte der Quantentheorie können sie später mit diesem experimentellen Rahmen in einen gemeinsamen Kontext stellen.

Abschließend sei noch bemerkt, dass aus der Dokumentation des Verständnisprozesses deutlich wird, welche Schlüsselstellung im Rahmen dieses Curriculums zum einen der räumlichen Formulierung des FERMAT-Prinzips zukommt und zum anderen, wie stark der Gangunterschied für optische Wege benachbarter Gitteröffnungen von $\delta_n = n \cdot \lambda$ zunächst von den Schülern auf eine Ebene senkrecht zu den Gitterstegen bezogen wird. Dass diese Bedingung eine Mannigfaltigkeit möglicher Verläufe in Form der LAUE-Kegel beschreibt, musste erst erarbeitet werden. Diese Schwierigkeit kann möglicherweise darauf zurückgehen, dass zuvor viele Aufgaben besprochen und geübt wurden, bei denen aufgrund des Versuchsaufbaus die optischen Wege stets senkrecht zu den Gitterstegen standen. Es wäre dann ein weiteres Beispiel dafür, dass die Schüler die vorwiegend im Unterricht besprochenen Experimente mit der Wertung des einzig möglichen Erscheinungszusammenhangs belegen. Dann müsste es Ziel des Unterrichtes sein, einen möglichst großen Erscheinungskontext zum Erlebnis zu bringen, um einer vorschnellen Wertung oder monokausalen Bewertung von Experimenten durch curriculare Maßnahmen entgegenzuarbeiten. Beugungsexperimenten mit Rotationen des Spaltes oder Gitters kommt insofern eine große Bedeutung zu.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Curriculum zur Beugung vorgestellt, welches sich in ein Kerncurriculum und Erweiterungsmodule gliedert. Das Kerncurriculum geht von einer systematischen Erarbeitung von Erscheinungsreihen aus, zunächst in Form von Freihandversuchen. Dabei werden periodische Strukturen vor das Auge gehalten und durchblickt. Erst in einem zweiten Schritt treten entsprechende komplexere Versuchsaufbauten hinzu. Der Zusammenhang zwischen den durchblickten oder durchleuchteten periodischen Strukturen und den Konfigurationen der Beugungsbilder wird im Konzept optischer Wege beschrieben. Optische Wege werden dazu operational definiert und als geometrische Ordnungselemente eingeführt, die dem Zusammenhang zwischen den jeweils wirksamen räumlichen Bedingungen und den auftretenden Erscheinungen immanent sind.

Den methodischen Rahmen des Kerncurriculum bildet damit eine phänomenologische Vorgehensweise - insbesondere, weil die optischen Wege nicht als ein Vorstellungskomplex gefasst werden, den man zur ursächlichen Erklärung eines Phänomens heranziehen kann. In einem Erweiterungsmodul des Curriculums wird im Einzelnen ausgeführt, wie es durch dieses methodische Vorgehen schon bei der Thematisierung der Beugung möglich ist, die holistischen Eigenschaften der Quantentheorie anzulegen und vorzubereiten. Dadurch kann der Übergang von der Beugung zur Quantentheorie in einem einheitlichen methodischen Rahmen erfolgen und eine vertikale Vernetzung der Unterrichtsinhalte unterstützen.

Entsprechend dem von ERB und SCHÖN ausgearbeiteten Lichtwegkonzept bekommt auch beim Konzept optischer Wege das FERMAT-Prinzip eine zentrale Stellung. Es wird in der vorliegenden Arbeit räumlich formuliert. Im zentralen Thema des Kerncurriculums, der Beugung am Gitter, reichen in Erweiterung des FERMAT-Prinzips dann zwei Bedingungen aus, die man an die optischen Wege stellen muss, um diese Beugungerscheinungen umfassend zu beschreiben. Auch komplexe Zusammenhänge, wie beispielsweise die Invarianz des Beugungsbildes unter Translationen des Gitters, sind so anschaulich zu erklären.

Das Beugungsbild eines Gitters tritt in der Brennebene einer Linse auf. Da es invariant unter Translationen des Gitters ist, darf auch ein Abstand zwischen Gitter und Linse gewählt werden, welcher größer als deren Brennweite ist. Je nach Stellung eines Schirms hinter der Linse

erhält man so entweder das Beugungsbild oder das Abbild des Gitters. Eine Darstellung beider Situationen im Konzept optischer Wege lässt den Zusammenhang zwischen Beugungs- und Abbild sehr deutlich hervortreten und macht Experimente zur optischen Filterung unmittelbar verständlich. Die in diesem Rahmen eingeführte *kontextuale Abbildung* rundet das Kerncurriculum ab und arbeitet die Gesamtheit der wirksamen Bedingungen besonders heraus. Gleichzeitig gelingt es, Eigenschaften der FOURIER-Transformation auf einer elementaren Ebene zu behandeln.

In einem der Erweiterungsmodule werden die Beugungsbilder bei Rotationen eines Gitters untersucht. Dabei treten Beugungsbilder in Form von Kegelschnitten auf. Es wird gezeigt, wie die schon im Kerncurriculum in Erweiterung des FERMAT-Prinzips formulierten beiden Bedingungen an die optischen Wege sich weiterhin als tragfähiger Beschreibungsansatz erweisen. Dabei können Elemente der Festkörperphysik anschaulich eingeführt werden – hier sind es die LAUE-Kegel. In einem anderen Erweiterungsmodul schließen sich eine anschauliche Herleitung des reziproken Gitters und der EWALD-Kugel an.

Das Erweiterungsmodul, welches den Übergang zur Quantentheorie thematisiert, geht von der Beugung am Doppelspalt aus und sieht dort die Einführung des Zeigerformalismus vor. Der Kontrast zur phänomenologischen Vorgehensweise des Kerncurriculums ermöglicht eine saubere Unterscheidung zwischen den optischen Wegen als immanenten Ordnungselementen und den Zeigern als abstrakten Symbolen, die Wellenfunktionen repräsentieren. Methodendiskussionen werden so unterstützt. Im Zentrum des Moduls steht die Besprechung von Welcher-Weg-Experimenten. Die kontextuale Abbildung im Konzept optischer Wege führt dabei, wie oben bereits erwähnt, ohne methodischen Bruch auf das Superpositionsprinzip der Quantentheorie.

Die schulische Erprobung des Kerncurriculums und einiger Erweiterungsmodule ergab schließlich, dass die operationale Definition der optischen Wege und die Formulierung von Kriterien an diese optischen Wege zur Beschreibung der Beugung es ermöglicht, durch tragfähige Begriffe bei den Schülern ein Bewusstsein für Zusammenhänge zwischen Teilinhalten des Unterrichtes zu wecken und die Beugung in eine Fülle optischer Erscheinungen zu integrieren. Der Übergang vom Experiment zu abstrakten Lerninhalten wird dann durch den Unterricht deutlich und generiert ein hohes Methodenbewusstsein.

Literaturverzeichnis

- ALTEHAGE, G. (1959): Durch das Brechungsgesetz definierte Abbildungen und deren geometrische Eigenschaften. Zulassungsarbeit. Freiburg.
- ARNDT, M. (2004): Wann uns Quantenteilchen klassisch erscheinen. In: Physik in unserer Zeit, 35, S. 113
- BADER, F. (1996): Eine Quantenwelt ohne Dualismus. Hannover: Schroedel.
- BADER, F. (2000): Quantenmechanik macht Schule. In: Physikalische Blätter. 10. S. 65-67
- BAUMERT, J., BOS, W., LEHMANN, R. (2000): TIMSS/III Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn. Opladen: Leske + Budrich.
- BERGMANN, SCHÄFER (1993): Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 3 Optik. Berlin, New York: de Gruyter.
- BERKLEY, G. (1912): Versuch einer neuen Theorie der Gesichtswahrnehmung. Leipzig: Felix Meiner.
- BLEICHROTH, W., DAHNCKE, H., JUNG, W., KUHN, W., MERZYN, G., WELTNER, K. (1999): Fachdidaktik Physik. Köln: Aulis.
- BÖHME, G. (1993): Alternativen der Wissenschaft. Frankfurt: Suhrkamp.
- BREDEHORST, H. (1999): Freihandversuche zur Beugung. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik. 7/48. S. 2
- BUCK, P., MACKENSEN, M. v. (1994): Naturphänomene erlebend verstehen. Köln: Aulis.
- DAHLMANN, W. (1998): Wie die Fußspur eines Vogels auf dem Schnee. Teil III: Zur Deutung der Attraktivität mechanisch-materieller Bilder und Modelle für (vermeintliches) Verstehen. In: chimica didactica 1. S. 4 - 26

- DINGLER, H. (2004): Gesammelte Werke. Hrsg.: WEIB, U. (2004): Berlin: Karsten Worm InfoSoftWare.
- DORN, BADER (1983): Physik. Oberstufe MS. Hannover: Schroedel.
- DORN, BADER (2000): Physik 12/13, Gymnasium Sek II. Hannover: Schroedel.
- EHRMANN, O., KOPPELMANN G. (1982): Beugungs- und Interferenzversuche mit einfachsten Mitteln. In: SCHARMANN, A. (Hrsg.): DPG, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1982, Gießen.
- ENGLERT, B.-G., WALTHER, H. (1992): Komplementarität in der Quantenmechanik. In: Physik in unserer Zeit, 23, S. 213
- EPA (2004): Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004. Internet: www.kmk.org/doc/publ/EPA-Physik.pdf
- EPSTEIN, L. C. (1988): Relativitätstheorie anschaulich dargestellt. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.
- ERB, R. (1994): Optik mit Lichtwegen. Bochum, Magdeburg: Westarp-Wissenschaften
- ERB, R., SCHÖN, L. (1996): Ein Blick in den Spiegel - Einblick in die Optik. In: FISCHLER, H. E.: Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II. Bonn: F. Dümlers.
- FEYNMAN, R. (2000): QED. München, Zürich: Piper.
- FEYNMAN, R., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. (1973): Vorlesungen über Physik Band I Teil 2. München: Oldenbourg.
- GAUDE, P, TESCHNER, W.-P. (1970): Objektivierete Leistungsmessung in der Schule. Frankfurt/M, Berlin, München: Diesterweg.
- GOETHE, J. W. (1966): Goethes Werke, Hamburger Ausgabe. Hamburg: C. Wegner.

- GOETHE, J. W. v. (1992): Zur Farbenlehre. In: GOETHES Farbenlehre. Mit Einleitungen und Kommentaren von R. STEINER. Bd. 1, hrsg. von G. OTT H. O. PROSKAUER. 5. Auflage. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben.
- GÖRNITZ, T. (1999): Quanten sind anders. Die verborgene Einheit der Welt. Berlin, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- GRANT, C. (1995): Weiterführende Optik mit FEYNMANS Zeigerformalismus. Ein didaktisches Konzept zur Einführung der Photonenoptik in der 13. Jahrgangsstufe eines Berliner Gymnasiums. Schriftliche Prüfungsarbeit zur zweiten Staatsprüfung für das Amt des Studienrates. Berlin: 1. Schulpraktisches Seminar Berlin-Steglitz.
- GREBE, J. (2001a): Vom Polarisations Schatten. In: Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht 54 (Heft 8), S. 452-454
- GREBE, J. (2001b): Doppeldrehung und Polarisation. In: Elemente der Naturwissenschaft 75 (Heft 2), S. 13-32
- GREBE-ELLIS, J. (2002a): Zum Haidinger-Büschel. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.) Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG 2002.
- GREBE-ELLIS, J., SOMMER, W., VOGT, J. (2002b): Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation. Materialien für einen modellfreien Optikunterricht im Grund- und Leistungskurs Physik. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle.
- GREBE-ELLIS, J. (2003): In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.) Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG 2003
- HAKEN, H., WOLF, H.C. (1987): Atom- und Quantenphysik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- HECHT, E. (2001). Optik. München, Wien: Oldenbourg.
- JULIUS, F.H. (1984): Entwurf einer Optik. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben.
- KANT, I. (1974): Kritik der reinen Vernunft 1. Hrsg.: WEISCHEDEL, W. (1974): Frankfurt am Main: suhrkamp taschenbuch wissenschaft.

- KOPITZKI, K. (1989): Einführung in die Festkörperphysik. Stuttgart: Teubner.
- KOPPELMANN, G., PFAFFE, S. (1983): Holographie - Eine Einführung mit Modell-Demonstrationen und Experimenten. In: SCHARMANN, A., HOFSTAETTER, A., KUHN, W. (Hrsg.): DPG, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1983, Gießen.
- KOPPELMANN, G., RUDOLPH, H. (1977): Photographisch hergestellte Beugungsobjekte für den Unterricht. In: SCHARMANN, A. (Hrsg.): DPG, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1977, Gießen.
- KOPPELMANN, G., SAWADE, G., TOTZECK, M. (1992): Zu Auflösungsgrenzen in der Physik. Optisches Institut, TU Berlin.
- KORNECK, F. (1998): Die Strömungsdynamik als Zugang zur nichtlinearen Dynamik. Aachen: Shaker Verlag.
- KÜBLBECK, J. & MÜLLER, R. (2002): Die Wesenszüge der Quantenphysik. Köln: Aulis.
- KUHN, W. (2000): Physik 2. Grundkurse Sekundarstufe II. Braunschweig: Westermann.
- LITT, T. (1959): Naturwissenschaft und Menschenbildung. Heidelberg: Quelle & Meyer.
- MACH, E. (1910): Populärwissenschaftliche Vorlesungen. Leipzig.
- MACKENSEN, M. V. (1992): Klang, Helligkeit, Wärme. Phänomenologischer Physikunterricht, entwickelt aus Praxis und Theorie der Waldorfschule. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle.
- MACKENSEN, M. V., OHLENDORF, H.-C. (1998): Modellfreie Optik. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle.
- MAIER, G. (1981): Über die Natur der Beugungsphänomene I. In: Elemente der Naturwissenschaft. 35. S. 26-42

- MAIER, G. (1984): Über die Natur der Beugungsphänomene II. In: Elemente der Naturwissenschaft. 40. S. 42-52
- MAIER, G. (1990): Die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen und ihr Verhältnis zur Gestalt der Blende. In: MAIER, G.: blicken-sehen-schauen. Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft. Hrsg: GREBE-ELLIS, J. (2004): Dürnau: Verlag der Kooperative Dürnau.
- MAIER, G. (1993): Optik der Bilder. 3. Auflage, Dürnau: Verlag der Kooperative Dürnau.
- NACHTIGALL, D., SIEMSEN, F. (1990): Das Wellenkonzept. Lehr-Lernbuch für Physik. Frankfurt am Main, Bern, New York, Paris: Lang.
- PITKA, R., BOHRMANN, S., STÖCKER, H., TERLECKI, G. (1999): Physik: der Grundkurs. Thun, Frankfurt am Main: Deutsch.
- PÖRKSEN, B. (2002): Die Gewissheit der Ungewissheit. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme.
- RESCH, E. (1981): Demonstrationsexperimente zur optischen Filterung. Staatsexamensarbeit. Karlsruhe: Institut für angewandte Physik.
- SCHÖN, L. (1992): Vom Sehen zur Optik - Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: H. Behrendt (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Erfurt 1992. Alsbach: S. 271-273 (1993).
- SCHÖN, L. (1994): Ein Blick in den Spiegel - Von der Wahrnehmung zur Physik. In: Physik in der Schule 32, 1, S. 2-5.
- SCHÖN, L. (1997): Schattenspiele - Überraschende Versuche mit Licht und Schatten nicht nur für die Mittelstufe. Manuskript zur DPG-Physikschule für Lehrer 1997. Bad Honnef.
- SEIPP, H. (2002): Grundversuch für die Lichtbeugung an Kanten. In: Elemente der Naturwissenschaft. 76. S. 35 - 50.
- SIEMSEN, F. (1997): Does Your Baby Know Things Your Students Don't? In: The Physics Teacher 35, S. 171

- SIEMSEN, F. (2002): Piaget und die Wellen. In: Pädagogisches Handeln, Heft 3, S. 247-250.
- SIMONY, K. (1990): Kulturgeschichte der Physik. Frankfurt/M: Harri Deutsch.
- STAIGER, E. [Hrsg.] (1977): Der Briefwechsel zwischen Schiller und Goethe. Frankfurt: Insel taschenbuch.
- STEINER, R. (1984): Grundlinien einer Erkenntnistheorie der Goetheschen Weltanschauung. Dornach/Schweiz: Rudolf Steiner Verlag.
- STÖRIG, H. J. (1993): Kleine Weltgeschichte der Philosophie. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch.
- UCKE, C., WOLF, R. (1999): Durch Farbe in die dritte Dimension. In: Physik in unserer Zeit 30, S. 50
- WAGENSCHNIEDER, M. (1962): Die pädagogische Dimension der Physik. Braunschweig: G. Westermann
- WAGENSCHNIEDER, M. (1970): Verstehen lehren. Weinheim, Berlin, Basel: J. Beltz.
- WEBER, T. (2003): Kumulatives Lernen im Physikunterricht. Berlin: Logos.
- WEINRICH, K. (1998): Die Lichtbrechung in den Theorien von Descartes und Fermat. Stuttgart: Franz Steiner.
- WEIZSÄCKER, C. F. v. (2002): Zum Weltbild der Physik. Leipzig, Stuttgart: S. Hirzel.
- WERNER, J. (2000): Vom Licht zum Atom. Berlin: Logos.

Anhang A: Aufgaben, Klausuren

A1 Aufgabe für die schriftliche Abiturprüfung des Leistungskurses Physik im Schuljahr 2002/2003

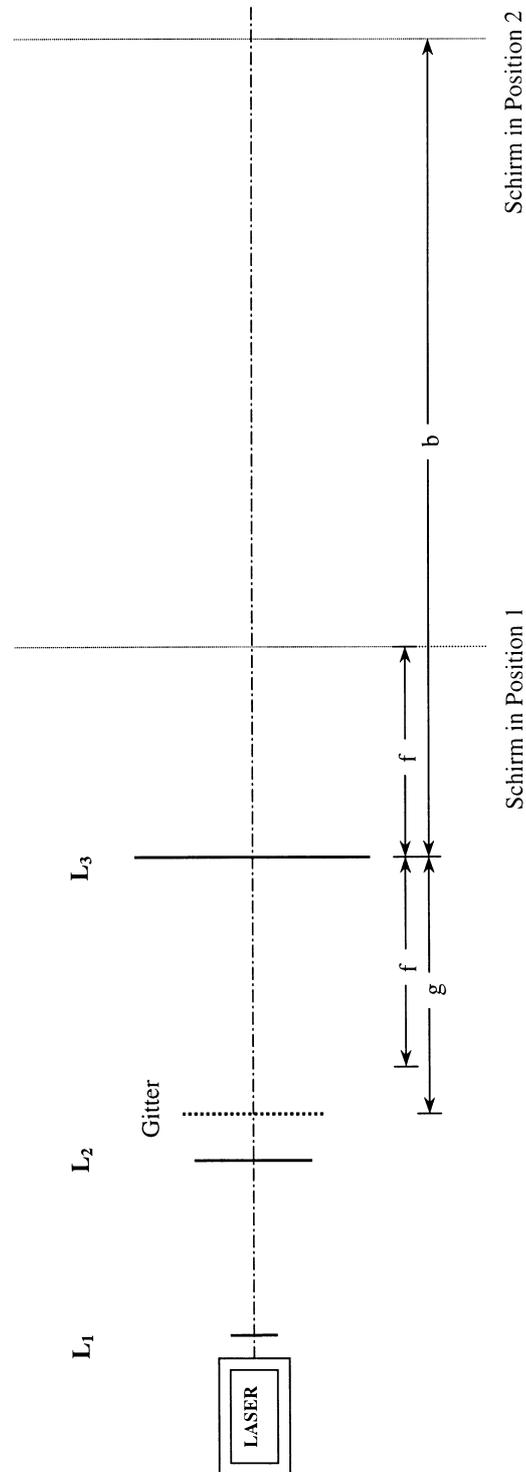
Vorschlag II - Aufgabe 2:

Mit einem Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) werden verschiedene Gitter durchleuchtet. Der Laserstrahl wird - wie *Anlage 1* zeigt - über die beiden Linsen L_1 und L_2 aufgeweitet. Zunächst steht der Schirm in Position 1.

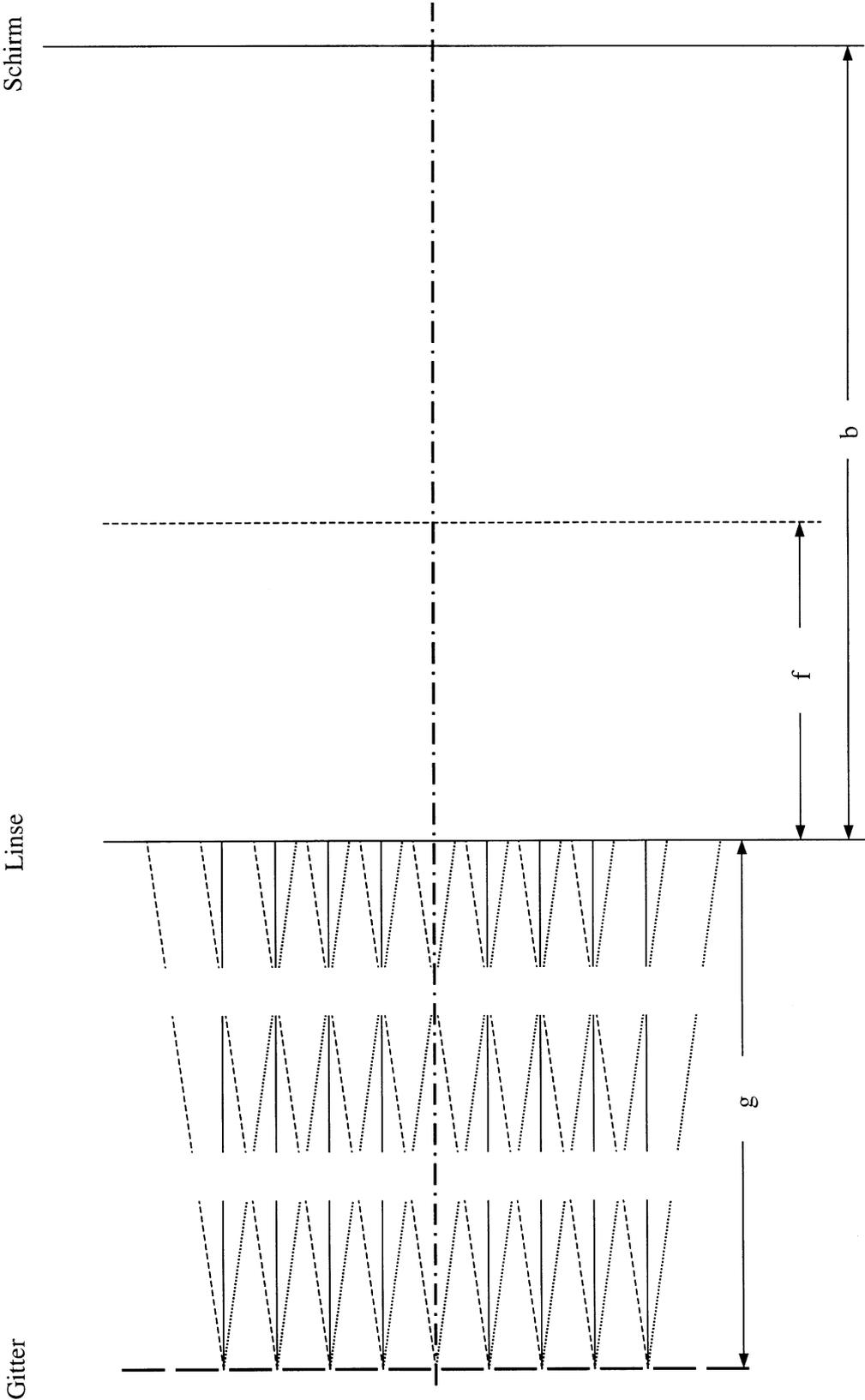
1. a) Was beobachten Sie auf dem Schirm, wenn ein Strichgitter mit *horizontalen* Strichen durchleuchtet wird? Setzen Sie eine kleine Gitterkonstante voraus.
b) Welche Aussagen können Sie daraus unter Berücksichtigung der Linse L_3 für die optischen Wege benachbarter Gitteröffnungen ableiten? - Erläutern Sie das anhand einer Skizze!
c) Welches Kriterium gilt für alle optischen Wege einer einzelnen Gitteröffnung?
2. Berechnen Sie die Gitterkonstante g sowohl aus den Beugungsmaxima erster als auch zweiter Ordnung. Die Beugungsmaxima 1. Ordnung befinden sich $d_1 = 2 \text{ mm}$ von der optischen Achse entfernt, für d_2 gilt: $d_2 = 4 \text{ mm}$.
3. Nun wird ein Strichgitter mit 300 Strichen pro Millimeter durchleuchtet. Die Gitterstriche stehen senkrecht. Bestimmen Sie graphisch mit Hilfe der EWALD-Kugel und des reziproken Gitters die Richtungen, unter denen die einzelnen Beugungsordnungen auftreten, und untersuchen Sie so auch, wie viele Beugungsordnungen überhaupt auftreten.
Hinweis: Verwenden Sie folgende Maßstäbe: $1 \mu\text{m} \equiv 3 \text{ cm}$ und $1 \mu\text{m}^{-1} \equiv 3 \text{ cm}$.
4. Unter Verwendung eines Strichgitters mit 40 senkrechten Strichen pro cm und schmalen Gitteröffnungen wird der Schirm von Position 1 in Position 2 gebracht. Der Abstand des Gitters zur Linse L_3 soll 75 cm betragen. Welchen Abstand zur Linse L_3 muss die Position 2 haben, damit man nun auf dem Schirm ein scharfes Abbild des Gitters sieht?
5. Zeichnen Sie die optischen Wege zwischen Linse und Schirm gemäß der als *Anlage 2* gegebenen Vorlage ein. Es handelt sich um eine Draufsicht auf den Versuch; die zwischen Gitter und Linse gegebenen optischen Wege sind fortzusetzen.
6. a) Erläutern Sie anhand Ihres Ergebnisses aus *Teilaufgabe 5* den Zusammenhang zwischen dem Beugungsbild und dem scharfen Abbild des Gitters auf dem Schirm.
b) Wie würde sich das Abbild ändern, wenn man in dem Beugungsbild außer den dritten und sechsten Ordnungen alle anderen Ordnungen ausblendete?
c) Welchen Einfluss hätten dann Verschiebungen des Gitters in Richtung der Linse auf das Beugungsbild und das Abbild (Schirm bleibt unverändert in Position 2)?
7. In einem Gedankenexperiment soll das Gitter der *Teilaufgaben 4 bis 6* so modifiziert werden, dass bei jeder Gitteröffnung ein Detektor integriert wäre, der registrieren kann, ob ein Photon die Gitteröffnung passiert oder nicht.
Welche Änderungen des Beugungs- und des Abbildes erwarten Sie? Begründung!

Vorschlag II - Aufgabe 2 Anlage 1:

L_1 : Brennweite 5 mm; L_2 : Brennweite 30 cm; L_3 : Brennweite 60 cm
LASER: $\lambda = 632,8$ nm



Vorschlag II - Aufgabe 2 Anlage 2:



Bewertung, Anforderungsbereiche, Gewichtung

Vorschlag II

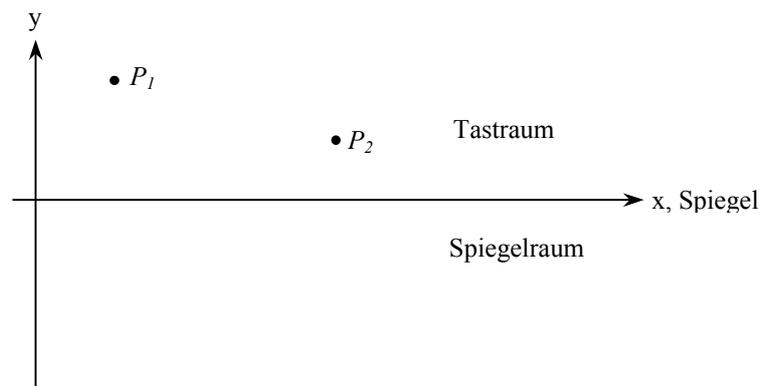
Erwartete Leistung	Unterrichtliche Voraussetzung	Anforderungsbereich			Summe
		I	II	III	
<u>Aufgabe 2:</u>					
1. a) Vertikales, äquidistantes Muster b) $n \cdot \lambda$ als Differenz. $n = 0, 1, 2 \dots$ c) Gleiche Länge aller opt. Wege bei einer bestimmten Beugungsordnung.	Beugungsbilder. Optische Weglängen bei Beugungsversuchen.	2 3 2			
2. Gitterkonstante berechnen	Beugung am Gitter	4	4		
3. Reziprokes Gitter und EWALD-Kugel zeichnen. Schnittpunkte legen die Richtung fest. 5 Ordnungen ablesen.	Reziprokes Gitter. EWALD-Kugel. Anspruchsvolles, systematisches Vorgehen erforderlich.		9		
4. Bildweite b berechnen	Linsenabbildungen	3			
5. Optische Wege einzeichnen	Beugungsbilder in der Brennebene einer Linse und ihr Zusammenhang zum Abbild in der Bildebene.		8		
6. a) Die opt. Wege jeder Gitteröffnung tragen zu jeder Beugungsordng. bei. Die opt. Wege einer Beugungsordng. tragen zum Kontrast der ganzen Abb. bei. b) Verkleinerung des Abstandes der Gitterstege erkennen. c) Einflüsse erläutern	Abbildungstheorie. Grenzen der Auflösung bei optischen Abbildungen. Eigenständige Anwendung sowohl der Reziprozität von Beugungs- und Abbild als auch der Invarianz des Beugungsbildes unter Translationen.		5	3 5	
7. Änderung des Beugungsbildes erläutern. Abbild bleibt unverändert.	Superpositionsprinzip am Doppel- und Einzelspalt. Anwendung auf Gitter und Linsenabbildung neu.			6	
<u>Zwischensumme Aufgabe 2:</u>		<u>14</u>	<u>26</u>	<u>14</u>	<u>54</u>

A2 Abschließende Erprobung: Klausur im Leistungskurs Physik

Aufgabe 1:

Vor einem senkrecht stehenden Spiegel befinden sich an den Punkten P_1 und P_2 senkrechte Metallstifte kleinen Durchmessers. Eine Lampe wird so justiert, dass sie beim Blick vom Tast- in den Spiegelraum mit den Metallstiften auf P_1 und P_2 in einer Flucht liegt.

Draufsicht:



1. Warum wird an Stelle des umgangssprachlichen Begriffes Spiegelbild hier der Begriff Spiegelraum verwendet?
2. Zeichnen Sie geometrisch korrekt auf dem Aufgabenblatt den Verlauf des optischen Weges im Tastraum zwischen den Punkten P_1 und P_2 ein.
3. Berechnen Sie mit Hilfe des FERMAT-Prinzips den Abknickpunkt des optischen Weges durch die Punkte P_1 und P_2 . Gehen Sie dabei von folgenden Koordinaten aus: $P_1(3/5)$ und $P_2(9/1)$.

Aufgabe 2:

Mittels einer Halogenlampe mit sehr kleiner Glühwendel, die im Brennpunkte einer Linse L_1 mit 50 cm Brennweite steht, werden unterschiedliche Gitter durchleuchtet. Mit Hilfe eines Schirmes und einer zweiten Linse L_2 von ebenfalls 50 cm Brennweite beobachtet man die den Gittern zugeordneten Beugungsbilder.

Einmal verwendet man ein Gitter mit 80 Strichen pro cm, dessen Striche vertikal stehen, das andere Mal verwendet man ein Gitter mit 100 Strichen pro cm, dessen Striche horizontal stehen.

1. Skizzieren Sie einen möglichen Versuchsaufbau. Erläutern Sie den Aufbau kurz.
2. Skizzieren Sie qualitativ die Struktur der beiden Beugungsbilder.

3. Welchen Bedingungen muss man an die optischen Wege stellen, um die Beugungserscheinungen zu beschreiben?
4. Welchen Abstand haben, sofern man einen Rotfilter mit $\lambda = 650 \text{ nm}$ verwendet, die benachbarten hellen Stellen des Beugungsmusters in horizontaler Richtung?
5. Wie groß ist λ , wenn in vertikaler Richtung die Beugungsmaxima 3. Ordnung 22 mm auseinander liegen? - Wieviel Prozent weicht der ermittelte Wert von dem erwarteten Wert $\lambda = 745 \text{ nm}$ ab?
6. Skizzieren Sie qualitativ das Beugungsbild für den Fall, dass man eine Struktur gemäß der nebenstehenden Abbildung verwendet.

7. Welche Ansicht erhält man auf dem Schirm, wenn man gar kein Gitter verwendet? - Was muss man demnach für eine eindeutige optische Abbildung fordern?
8. Vergleichen Sie Ihre Aussagen in *Teilaufgabe 7* mit Aussagen der Quantentheorie.

Aufgabe 3:

Ein Laser steht vor einem Gitter, welches gekippt wird (Laserstrahl horizontal, Gitterstege senkrecht, Kippachse waagrecht). Auf einem Schirm beobachtet man die Abwandlungen des Beugungsbildes.

1. Erklären Sie, warum das Beugungsbild bei großen Kippwinkeln in Form einer Ellipse auf dem Schirm erscheint.
2. Würde sich - abgesehen von Intensitätsänderungen - die Form der Ellipse ändern, wenn man an jede Gitteröffnung einen Welchen-Weg-Detektor baute und so den Gang der Photonen registrierte?

Erwartete Leistung, Bewertung

Erwartete Leistung	Anforderungsbereiche		
	I	II	III
<u>Aufgabe 1:</u>			
1. Begriff des Spiegelraums erläutern. Bezug zum perspektivischen und parallaktischen Sehen herstellen.	4		
2. P_1 und P_2 im Spiegelraum festlegen. Verlauf des optischen Weges einzeichnen.	4		
3. Optische Weglänge zwischen P_1 und P_2 als Funktion der Abknickstelle berechnen. Minimum der optischen Weglänge berechnen.		6	4
Zwischensumme Aufgabe 1:	8	6	4
<u>Aufgabe 2:</u>			
1. Skizze. Kurze Erläuterung des Versuchsaufbaus.	2	3	
2. Qualitative Skizze der Beugungsbilder.		4	
3. Beide Bedingungen, sowohl die, welche an die optischen Wege einer Gitteröffnung, als auch die, welche an die optischen Wege benachbarter Gitteröffnungen gestellt werden müssen, nennen.	4		
4. Abstand der hellen Stellen des Beugungsmusters in horizontaler Richtung errechnen.		6	
5. Basislänge λ und prozentuale Abweichung vom erwarteten Wert berechnen.		9	
6. Beugungsbild der waagrechten Gitterstege und der Struktur innerhalb der waagrechten Gitterstege erkennen.			6
7. Abbildung der Glühwendel erkennen. Keine wesentliche Einschränkung des Linsenquerschnitts bzw. des Beleuchtungskegels für eine eindeutige optische Abbildung fordern.	2	3	
8. Bei Welcher-Weg-Experimenten ergibt sich, dass man die Gesamtheit des Gitters durch entsprechende Detektoren auflöst. Nur wenn man sie erhält, bleibt das Beugungsbild unverändert. Man bestimmt dann also die Photonenwege nicht. Bei der optischen Abbildung muss man ebenfalls auf dieses Wissen verzichten, wenn man die eindeutige Zuordnung von Gegenstands- und Bildebene erhalten will.		6	
Zwischensumme Aufgabe 2:	8	31	6

<u>Aufgabe 3:</u>			
1. Die Forderung gleicher optischer Weglängen innerhalb einer Gitteröffnung führt auf den Gitterkegel. Bei hinreichend großen Kippwinkeln schneidet der Schirm aus dem Gitterkegel eine Ellipse.		6	
2. Nein. Der Gitterkegel geht auf die Forderung an die optischen Weglängen innerhalb einer Gitteröffnung zurück.			4
Zwischensumme Aufgabe 3:		6	4
Summe:	<u>16</u>	<u>43</u>	<u>14</u>

Eine Leistung wird mit 01 Punkt bewertet, wenn mindestens 20%, mit 05 Punkten bewertet, wenn mindestens 45% der erwarteten Gesamtleistung erzielt werden. Im Übrigen erfolgt eine lineare Zuordnung zwischen Leistung und Punktebewertung.

Weitere Klausuren einschließlich Musterlösungen finden sich bei GREBE-ELLIS (2002b).

Anhang B: Fragebögen

B1 Fragebogen zur Schülervorlesung am Donnerstag, den 20.11.03

1. Die Schülervorlesung war für mich
aufgebaut.
 - sehr verständlich
 - verständlich
 - teilweise verständlich
 - unverständlich

2. Die Vorstellungübung am Anfang empfand ich als einen
Einstieg.
 - sehr motivierenden
 - motivierenden
 - wenig motivierenden
 - misslungenen

3. Die Experimente mit der Prospekthülle, dem Gewebe und der Brille mit Gitter waren
überflüssig.
 - sehr faszinierend
 - faszinierend
 - wenig faszinierend

4. Die Experimente mit der Prospekthülle, dem Gewebe und der Brille mit Gitter machten
mich auf die Erklärung
überhaupt nicht neugierig.
 - sehr neugierig
 - neugierig
 - etwas neugierig

5. Den Erklärungsweg erlebte ich im Vergleich zu meinem sonstigen Physikunterricht als
rundum einfach.
 - sehr anspruchsvoll
 - anspruchsvoll
 - wenig anspruchsvoll

6. Ohne die Vorstellungübung hätte ich die Erklärung der Kegel wahrscheinlich
genauso gut verstanden
weniger gut verstanden
nur in einigen Aspekten verstanden
auch nicht verstanden.
7. Die Darstellung der Ideen von SNELLIUS, DESCARTES und FERMAT zur Erklärung der Brechung machten mir
sehr gut
gut
weniger gut
überhaupt nicht
verständlich, welches Ziel das Konzept optischer Wege anstrebt.
8. War die Auswertung, welche sich an die Experimente anschloss, eine verständliche Erklärung, die Sie zufrieden stellte?
ja, sehr verständlich
ja, verständlich
weiß nicht
nein, die Erklärung war unverständlich
nein, die Erklärung war irgendwie komisch.
9. Im Unterricht würde ich mir häufiger solche Erklärungswege oder Auswertungen wünschen, wie ich sie in der Vorlesung kennengelernt habe.
ja, so oft wie möglich
ja, immer wieder
von Zeit zu Zeit wäre das in Ordnung
nein, bitte nicht!
10. Zu dem Erklärungsweg, den ich in der Vorlesung kennengelernt habe, meine ich, wenn ich ihn mit dem Wellenmodell vergleiche, Folgendes:

B2 Fragebogen zur abschließenden Erprobung

Codewort: _____

Kreuzen Sie bitte je nachdem, welcher Aussage Sie eher zustimmen, einen Wert auf der fünfstufigen Skala an.

1.	Der Stoff der Physikepoche war interessant.	1 2 3 4 5	Der Stoff war eigentlich nicht interessant.
2.	Die behandelten Inhalte zum Spiegel, zur Hebung und zur Linse waren anschaulich.	1 2 3 4 5	Die behandelten Inhalte zum Spiegel, zur Hebung und zur Linse waren überhaupt nicht anschaulich.
3.	Die behandelten Inhalte zur Beugung waren anschaulich.	1 2 3 4 5	Die behandelten Inhalte zur Beugung waren überhaupt nicht anschaulich.
4.	Die Begriffe Sehraum und Tastraum bzw. Sehweg und Tastweg haben viel für das Verständnis gebracht.	1 2 3 4 5	Die Begriffe Sehraum und Tastraum bzw. Sehweg und Tastweg haben nichts zum Verständnis gebracht, sie waren lediglich hochtrabende Bezeichnungen.
5.	Der Begriff des optischen Weges trug viel zum Verständnis bei.	1 2 3 4 5	Der Begriff des optischen Weges trug nichts zum Verständnis bei.
6.	Das FERMAT-Prinzip trug viel zum Verständnis bei.	1 2 3 4 5	Das FERMAT-Prinzip trug nichts zum Verständnis bei.
7.	Die Beugung zeigt mir besonders deutlich, wie man mit wenigen geometrischen Bedingungen ein ganzes optisches Gebiet ordnen und überblicken kann.	1 2 3 4 5	Die Beugung ist kompliziert. Die geometrischen Bedingungen sind nur sehr schwer, für mich eigentlich kaum zu überblicken.
8.	Die ausgiebige Behandlung der Beugung hat mir geholfen, Aspekte der Quantentheorie, wie beispielsweise die Nichtlokalisierbarkeit, in die Physik einzuordnen.	1 2 3 4 5	Aspekte der Quantentheorie wie die Nichtlokalisierbarkeit bleiben mir fremd. Ich kann sie physikalisch nicht einordnen. Daran konnte auch die Behandlung der Beugung nichts ändern.
9.	Im Laufe des Unterrichtes habe ich immer besser verstanden, was für die Entstehung eines Abbilds auf der Netzhaut alles wesentlich ist. Das Verständnis des Sehens vertiefte sich durch den Physikunterricht immer mehr.	1 2 3 4 5	Mit der Linsenabbildung, der Beugung und der Lochkamera kann man auch etwas über das Sehen und das Auge verstehen. Von daher kam das Auge als Beispiel mehrmals vor. Etwas Zusammenhängendes zum Sehen ergab sich aber nicht.

Codewort: _____

10.	Der Unterricht hat mir gefallen.	1 2 3 4 5	Der Unterricht hat mir nicht gefallen.
11.	Ich konnte dem Unterricht immer folgen.	1 2 3 4 5	Ich konnte dem Unterricht nie richtig folgen.
12.	Ich habe beim Unterricht oft das Gefühl gehabt, plötzlich etwas Wichtiges verstanden zu haben.	1 2 3 4 5	Ich habe beim Unterricht nie das Gefühl gehabt, etwas Wichtiges verstanden zu haben.
13.	Die Experimente haben mich fasziniert.	1 2 3 4 5	Die Experimente waren für mich ohne Faszination.
14.	Nachdem ich die Experimente gesehen hatte, war ich stets auf die Erklärung neugierig.	1 2 3 4 5	Die Experimente sollten mich wohl auf Erklärungen neugierig machen; ich hätte mich aber gerne mit der reinen Mitteilung der Erklärung zufrieden gegeben.
15.	Für mich gehören die Experimente und die im Unterricht daran entwickelten Erklärungen unmittelbar zusammen.	1 2 3 4 5	Für mich sind die Experimente und die im Unterricht daran entwickelten Erklärungen zwei Dinge, die ich eigentlich nicht zusammenbringen kann.
16.	Im Vergleich mit anderen Unterrichten stellen mich die Erklärungen des Physikunterrichtes vollauf zufrieden.	1 2 3 4 5	Im Vergleich mit anderen Unterrichten bleiben für mich die Erklärungen des Physikunterrichtes irgendwie schwammig.
17.	Es gab genügend Möglichkeit, sich am Unterricht aktiv zu beteiligen.	1 2 3 4 5	Es gab zu wenig Möglichkeiten, sich aktiv am Unterricht zu beteiligen.
18.	Die Diskussionen, während im Unterricht die Erklärungen erarbeitet wurden, verliefen durchweg produktiv.	1 2 3 4 5	Die Diskussionen, während im Unterricht die Erklärungen erarbeitet wurden, verliefen durchweg unproduktiv.
19.	Die Höhe der Anforderungen empfand ich angemessen.	1 2 3 4 5	Die Höhe der Anforderungen empfand ich übertrieben. Das verlangte Niveau war eindeutig zu hoch.
20.	Auch außerhalb des Unterrichtes habe ich mit anderen über die behandelten Inhalte diskutiert.	1 2 3 4 5	Ich habe nie mit jemandem außerhalb der Unterrichtszeiten über die Inhalte des Physikunterrichtes gesprochen.

Anhang C: Glossar

- 1. Bedingung an die optischen Wege zur Beschreibung der Beugung am Gitter*
- Für benachbarte Gitteröffnungen unterscheiden sich die Längen optischer Wege um $\delta_n = n \cdot \lambda$. Siehe auch Kapitel 4.3.3.
- 2. Bedingung an die optischen Wege zur Beschreibung der Beugung am Gitter*
- Die optischen Wege einer Gitteröffnung sind alle gleich lang. Siehe auch Kapitel 4.3.3.
- abgelöster Versuch*
- In einer älteren Bezeichnungsweise: objektiver Versuch. Eine Beobachterin oder ein Beobachter schaut von außen auf den Versuchsaufbau. Auf diese Weise ist die Teilnahme distanziert, auf eine intellektuelle Durchdringung des Experimentes hin ausgerichtet. An die Stelle der Nähe zur Erscheinung in *eingebundenen Versuchen* tritt ein größerer Abstand zum Experiment. Siehe auch Kapitel 4.2.
- eingebundener Versuch*
- In einer älteren Bezeichnungsweise: subjektiver Versuch. Eine Beobachterin oder ein Beobachter bindet sich in den Versuchsaufbau ein. Auf diese Weise ist die Teilnahme unmittelbar, der Erlebnisbezug zum Experiment direkt. An die Stelle der Distanz *abgelöster Versuche* tritt eine größere Nähe zur Erscheinung. Siehe auch Kapitel 4.2.
- kontextuale Abbildung*
- Bezeichnung dafür, dass der Kontext des gesamten, kohärent durchleuchteten Gitters für die Ausbildung des Beugungsbildes wesentlich ist. Siehe auch Kapitel 4.4.2.
- optischer Weg*
- Optische Wege ergeben sich in *eingebundenen Versuchen*, wenn man die möglichen Sichtverbindungen aufsucht, in *abgelösten Versuchen*, wenn man die möglichen Schattengrenzen verfolgt. Sie sind gedankliche und idealisierende Elemente, mit denen die räumlichen Bedingungen eines optischen Versuchsaufbaus auf die sich ergebenden Erscheinungen bezogen werden. Siehe auch Kapitel 3.3.2
- Sehraum*
- Raum, der die Konfiguration von Gegenständen so zusammenfasst, wie sie sich aus dem perspektivischen, parallaxtischen oder stereoskopischen Entfernungssehen ergibt. Am Spiegel, bei der Hebung und bei der Beugung ist er nicht mehr mit dem *Tastraum* identisch. Siehe auch Kapitel 3.1.2 und 3.1.3.

Tastraum

Raum, der die Konfiguration von Gegenständen so zusammenfasst, wie sie sich aus der räumlichen Ordnung von Tastwahrnehmungen ergibt. Er entspricht dem Raum, auf den sich üblicherweise die räumliche Anordnung der Versuchsgegenstände bezieht. Siehe auch Kapitel 3.1.2 und 3.1.3.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Wilfried Sommer
Geburtsdatum: 18. Mai 1967
Geburtsort: Stuttgart
Familienstand: verheiratet

Schulbildung:

1973 - 1986 Freie Waldorfschule am Kräherwald, Stuttgart

Wehrdienst:

1986 - 1987 Ableistung des Wehrdienstes, Nürnberg

Studium und Praktika:

1986 3 Monate Vermessungspraktikum im Stadtmessungsamt, Stuttgart

1988 6 Monate Praktikum am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, in der wissenschaftlichen Servicegruppe Technologie bei Dr. H.-U. Habermeier. Die dort erzielten Forschungsergebnisse in der Supraleitung sind mit mehreren Preisen ausgezeichnet worden. Bis 1990 Teilzeitanstellung.

Beginn des Physikstudiums an der Universität Stuttgart

Beginn einer studienbegleitenden Tätigkeit als Jugendgruppenleiter

1990 Aufnahme in die Studienstiftung des deutschen Volkes

1994 Abschluss des Studiums. Die Diplomarbeit mit dem Thema „FT-IR Absorptions- und Reflexionsuntersuchungen an organischen Metallen“ wurde bei Prof. Dr. D. Schweitzer am 3. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart angefertigt.

1995 - 96 Besuch des Lehrerseminars für Waldorfpädagogik, Kassel. Ausbildung zum Oberstufenlehrer mit den Fächern Informatik, Mathematik und Physik.

Beruf:

1994 Wissenschaftliche Arbeit am Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz, in der Kernspinresonanz bei Prof. Dr. H. W. Spiess

1996 - 2003 Lehrer an der Freien Waldorfschule Frankfurt am Main. Unterricht in den Klassen 6 - 13.

1999 Beginn einer Nebentätigkeit als Dozent am Lehrerseminar für Waldorfpädagogik, Kassel

2000 - 2002 Leitung eines Forschungsprojektes zur Optik an der Pädagogischen Forschungsstelle beim Bund der Waldorfschulen

seit 2003 Leitender Dozent am Lehrerseminar für Waldorfpädagogik, Kassel und Lehrer an der Freien Waldorfschule Kassel

Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur Beugung im Rahmen eines Promotionsvorhabens unter der Betreuung von Prof. Dr. F. Siemsen und Prof. Dr. T. Görnitz am Institut für Didaktik der Physik der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

