

Optik in Mittel- und Oberstufe

Didaktik der Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

O p t i k i n M i t t e l - u n d O b e r s t u f e

Zusammenstellung von Veröffentlichungen für Interessenten unserer Curriculumsentwicklung im Bereich der Optik.

Humboldt-Universität zu Berlin, Didaktik der Physik

Zur Dokumentation unserer Forschungsarbeit im Bereich der Curriculumsentwicklung in der Optik haben wir einige Veröffentlichungen zusammengestellt, die einerseits unser Curriculum in der Übersicht schildern, andererseits zu einzelnen Themen zusätzliche Informationen liefern.

Diese Zusammenstellung ist in mehrere Abschnitte gegliedert. Der erste Teil beleuchtet unsere Anfangsoptik, die zur Fermat-Optik erweitert wird und im Sinne unseres kumulativen Anspruchs in der Zeiger-Optik gipfelt, wobei dabei immer wieder Anregungen für die Unterrichtspraxis gegeben werden. Der daran anschließende Teil widmet sich der fachdidaktischen Forschung und gibt Einblick in den aktuellen Stand der Evaluation dieses Unterrichtsgangs. Wir beenden die Präsentation unserer Arbeiten schließlich mit Überlegungen zur Phänomenologie der Polarisation.

Lutz-Helmut Schön
Roger Erb
Thomas Weber
Johannes Werner
Johannes Grebe-Ellis
Pascal Guderian

Berlin, im April 2003

Humboldt-Universität zu Berlin
Didaktik der Physik
Newtonstr. 15
12489 Berlin
Tel.: 030/2093 7945
Fax.: 030/2093 7995
schoen@physik.hu-berlin.de
thomas.weber@physik.hu-berlin.de
jwerner@physik.hu-berlin.de
johannes.grebe@physik.hu-berlin.de
pascal.guderian@physik.hu-berlin.de

Inhaltsverzeichnis

I	Anfangsoptik	1
1	Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik	3
1.1	Vom Sehen zur Optik	4
1.1.1	Bevor es losging	5
1.1.2	Der Blick in die Spiegelwelt	5
1.1.3	”Der Ebene Spiegel ist ein Fenster in die Spiegelwelt”	8
1.1.4	Eingriff in die Spiegelwelt	8
1.1.5	Hohl- und Wölbspiegel	10
1.2	Geometrische Optik	12
1.2.1	Lichtausbreitung	13
1.2.2	Reflexion und kürzeste Wege	13
1.2.3	Gebogene Spiegel	14
1.2.4	Lichtwege am gebogenen Spiegel und Intensität	15
1.2.5	Fermat-Prinzip	16
1.2.6	Optische Abbildung	16
1.3	Weiterführende Optik	17
1.3.1	Partielle Reflexion	17
1.3.2	Quantenhafte Wechselwirkung	18
1.3.3	Interferenz	19
1.3.4	Zeigerformalismus	20
1.3.5	Hinführung zur Beugung	21

1.3.6	Reflexion	21
1.3.7	Weitere Inhalte	23
1.3.8	Schluss	23
	Literaturverzeichnis	24
2	Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik	27
2.1	Beobachtungen am Spiegel	27
2.1.1	Die Wirklichkeit der Spiegelwelt	28
2.1.2	Messen in der Spiegelwelt	29
2.1.3	Vertauscht der Spiegel links und rechts?	31
2.1.4	Was haben wir anders gemacht?	32
2.2	Bezug zur Alltagswelt?	32
2.3	Schluss	34
	Literaturverzeichnis	34
3	Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz	35
3.1	Der Anfang und das Ganze	35
3.2	Die Entdeckung des Spiegels	38
3.3	Das Doppelschattenexperiment	39
3.4	Lösungsansatz mit dem Prinzip "Prinzip Ameise"	41
3.5	Licht und Schatten in der Spiegelwelt	44
3.6	Das Spiegelgesetz	46
3.7	Ausblick: Lichtwegkonzept	49
	Literaturverzeichnis	49
4	Die Schusterkugel	51
5	Curved Mirrors	55
5.1	Image formation and geometrical optics	55
5.2	The flat mirror	56

5.3	The curved mirror	56
5.4	Image formation	57
	Literaturverzeichnis	58
II	Fermat-Optik	59
6	Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip	61
6.1	Optik in der Sekundarstufe I	61
6.2	Einbindung der geometrischen Optik in "Vom Sehen zur Optik"	62
6.2.1	Thematische Abfolge der geometrischen Optik	62
6.3	Das Fermat-Prinzip	63
6.4	Durchführung im Unterricht	65
6.4.1	Geradlinige Ausbreitung	65
6.4.2	Reflexion	65
6.4.3	Brechung	67
6.5	Resümee	68
	Literaturverzeichnis	69
7	Die Fadenkonstruktion gekrümmter Spiegel	71
7.1	Vom Sehen reeller und virtueller Bilder	71
7.2	Optische Eigenschaften von Gegenstand und Bild	73
7.3	Die Fadenkonstruktion	74
7.3.1	Experimentelle Prüfung	76
7.4	Ein Vorschlag für den Physikunterricht?	77
	Literaturverzeichnis	78
8	Das Fermat-Prinzip in der Schule	79
8.1	Inhaltlicher Aufbau des Unterrichtskonzepts	79
8.2	Ziele und Durchführung der Erprobung	80
8.3	Ergebnisse der Datenerhebung	80
8.4	Ausblick	82
	Literaturverzeichnis	83

III	Zeiger-Optik	85
9	Optik in der Oberstufe	87
9.1	Unser Bild vom Licht	87
9.2	Elemente des Optikunterrichts in der Oberstufe	88
9.3	”Stimmige Denkwege sind lustvoll”	89
9.4	Der Zeigerformalismus	90
9.5	Bedeutung des Zeigerformalismus für den Optikunterricht	92
9.6	Ein Unterrichtsvorschlag	93
9.7	Abschliessende Bemerkungen	99
	Literaturverzeichnis	99
10	Berechnung von Beugungsbildern	101
10.1	Einleitung	101
10.2	Zeigerformalismus	102
10.3	Zwei Beispiele zur Veranschaulichung	103
10.4	Konkrete Beugungsprobleme	104
10.5	Weitere Anwendungen	106
	Literaturverzeichnis	107
11	Warum ist Glas durchsichtig?	109
11.1	Zeigerformalismus im Lichtwegkonzept	110
11.2	Konzept zur Beschreibung der Lichtausbreitung im Medium	111
11.3	Lichtausbreitung im Glas	113
11.4	Ein Thema für Schule?	115
	Literaturverzeichnis	116
12	Das Loch in der Seifenblase	117
12.1	Beobachtung des Loches in einer Seifenblase	118
12.2	Physikalische und chemische Hintergründe	119
12.3	Die Darstellung im Zeigerformalismus	120
12.4	Einsatz des Phänomens im Optikunterricht	121
	Literaturverzeichnis	122

IV	Fachdidaktische Forschung	123
13	Fachdidaktische Forschung am Beispiel Optik	125
13.1	Einleitung	125
13.2	Fachdidaktische Forschung am Optikcurriculum	126
13.2.1	Fachinhaltliche fachdidaktische Forschung	127
13.2.2	Evaluationsforschung am Beispiel des Optik-Curriculums	129
13.2.3	Empirische pädagogische Forschung	130
13.3	Schluss	135
	Literaturverzeichnis	137
14	Curriculare Forschung am Beispiel Optik	139
14.1	Legitimation und Wege fachdidaktischer Forschung	141
14.2	Fachdidaktische Forschung an unserem Optik-Curriculum	142
14.3	Schlussbemerkung	143
	Literaturverzeichnis	143
15	Vom Licht zum Atom	145
15.1	Inhalt der Unterrichtseinheiten	145
15.2	Ziele und Ergebnisse der Erprobung	146
	Literaturverzeichnis	149
16	Kumulatives Lernen mit dem Lichtwegkonzept	151
16.1	Der Begriff kumulativen Lernens	152
16.2	Instruktionsmassnahmen zur Förderung kumulativen Lernens	153
16.3	Kumulatives Lernen und Struktur des Lichtwegkonzepts	153
16.4	Untersuchung kumulativen Lernens am Beispiel des Lichtwegkonzepts	153
16.5	Ausblick	154
	Literaturverzeichnis	155

V	Polarisation – Phänomenologisch	157
17	Zur Phänomenologie der Polarisation	159
17.1	Beobachtung	160
17.2	Beobachtung des Himmels	161
17.3	Beobachtung des Atmosphärenbüschels	161
17.4	Beobachtung mit einer Polarisationsfolie	162
17.5	Zusammenfassung	163
	Literaturverzeichnis	163
18	Vom Polarisations Schatten	165
18.1	Einleitung	165
18.2	Beobachtung	166
18.3	Erscheinungsbedingungen des Polarisations Schattens	168
	Literaturverzeichnis	170
19	Zum Haidinger-Büschel	171
19.1	Einleitung	171
19.2	Das Haidinger-Büschel	173
19.3	Wie kann man das Haidinger-Büschel beobachten?	174
19.3.1	Das "Atmosphärenbüschel"	174
19.3.2	Das "Oberflächenbüschel"	174
19.3.3	Das "Festkörperbüschel"	174
19.3.4	Das "Beziehungsbüschel"	175
19.4	Wie entsteht das Haidinger-Büschel im Auge?	176
19.5	Ein Modell	177
19.6	Schluss	179
	Literaturverzeichnis	179

20 Doppeldrehung und Polarisation	183
20.1 Doppeldrehung	185
20.2 Polarisation und Skalarprodukt	185
20.3 Orientierung	187
20.4 Doppelbrechung – Doppeldrehung	187
20.5 Polarisationszustände	193
20.6 Die Helligkeitsfunktion	196
Literaturverzeichnis	199
21 Exakte Phänomenologie der Polarisation	205
21.1 Zur Phänomenologie der Polarisation	206
21.2 Operationale Zustandsdefinition	207
21.3 Zustandstransformationen	210
21.4 Beispiele	213
21.5 Schluss	214
Literaturverzeichnis	214

Teil I

Anfangsoptik

Veröffentlichung 1

Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik

Roger Erb, Lutz Schön

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: Hans E. Fischer (Hrsg.). *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmers Verlag, 1996)

Vorbemerkung

Seit einigen Jahren arbeiten wir in Kassel an der Entwicklung eines Curriculums zur Optik, das mit dem Anfangsunterricht in Physik in der Mittelstufe beginnt und bis in die Grund- und Leistungskurse der Oberstufe reicht. Im Zentrum dieses Curriculums steht das Sehen: Während in der Mittelstufe zunächst die unmittelbar, dann die im Spiegel und im Wasser und durch Glas hindurch gesehenen Dinge Ausgangspunkt der Untersuchung von Lichtausbreitung, Reflexion und Brechung sind, wird in der Oberstufe die Betrachtung modifiziert und nun die Beziehung zwischen Sender und Empfänger untersucht und schließlich durch einen abstrakten Formalismus beschrieben.

Es ist uns bewusst, dass die *vollständige* Realisierung dieses Unterrichtsvorschlages heute noch viele schulorganisatorische Probleme aufwirft. Es sind jedoch auch einzelne Teile des Curriculums in den Physikunterricht integrierbar. Hierzu haben wir an verschiedenen Stellen Vorschläge unterbreitet [Sch84, Erb92, Sch93b, Sch94, Erb94, Erb95, ES95]. Auch in dem Schulbuch, an dem wir mitarbeiten, konnten zahlreiche Elemente verwirklicht werden [BSS94, BSS95].

Eine besondere Möglichkeit "unsere" Optik zu unterrichten, bietet sich in Grundkursen der Oberstufe. So sahen beispielsweise die Kursstrukturpläne des Landes Hessen¹ einen Halb-

¹Leider ist in den neuen Kursstrukturplänen von 1994 des Landes Hessen die Optik nicht mehr vorgesehen.

jahreskurs in Klasse 11 vor, der "einerseits unterschiedliche Voraussetzungen der Schüler so weit wie möglich ausgleichen, andererseits eine den Fähigkeiten und Interessen der Schüler entsprechende Wahl von Grund- und Leistungskursen im Kurssystem zu ermöglichen [soll]. ...Empfohlen wird für das Halbjahr 11/I das Kursthema: 'Modellvorstellungen von Licht und Materie'" [Lan79]. Für diesen Lehrplan haben wir in Kassel schon 1979 Vorschläge erarbeitet, die sich allerdings grundlegend von unseren heutigen unterscheiden [Sch81a, Sch81b].

Mit dem vorliegenden Beitrag wollen wir einen Unterrichtsvorschlag für einen etwa halbjährigen Kurs in der Oberstufe zur Diskussion stellen, der Elemente der Mittelstufenoptik aufgreift und bis hin zur modernen Modellvorstellung vom Licht führt. Den roten Faden bildet dabei die Reflexion: vom sicht- und erlebbaren Spiegelbild bis hin zum Reflexionsgitter, an dem Beugung beobachtet wird und die erarbeitete Modellvorstellung überprüft wird.

Wenn im folgenden einzelne Unterrichtsabschnitte sehr detailliert geschildert werden, so nicht mit dem Anspruch, dass der Unterricht genau so abzulaufen habe, sondern um dem Leser neben den inhaltlichen Angaben ein anschauliches Bild vom möglichen Unterricht zu geben. Diese unterrichtsnahen und deshalb lebendig geschriebenen Abschnitte des Beitrages sind serifenlos gesetzt.

Um den Umfang des Beitrages nicht zu sehr auszudehnen, werden wir im Abschnitt vom "Sehen zur Optik" lediglich die Spiegelbilder am ebenen Spiegel ausführlich behandeln, die Bilder beim Wölb- und Hohlspiegel dagegen nur skizzieren.

1.1 Vom Sehen zur Optik – Spiegelbilder

Die Optik, so wie sie in der Schule gelehrt wird, hat das Sehen verlernt. Allzu schnell sollen wir dem Augenschein nicht mehr trauen dürfen, und allzu schnell müssen wir statt dessen Lichtstrahlen verfolgen, abknicken und sich schneiden lassen und sollen uns daraus mit Bleistift und Lineal Bilder machen. Dabei hat noch niemand einen Lichtstrahl gesehen! Dies wird auch in den Lehrbüchern der Physik betont, denn der (physikalische) Lichtstrahl ist lediglich ein Gedankenkonstrukt, ein Modell und ein Hilfsmittel.

Wir wissen, und selbstverständlich weiß dies auch der Physiker, dass wir in allen Richtungen Dinge sehen, helle und dunkle, bunte und graue; es sei denn, wir schließen die Augen. Zu den sehr hellen Dingen, die wir sehen können, gehören die Sonne und die vielen Lampen. Diese blenden uns vielleicht, aber Licht sehen wir deshalb dennoch nicht: wir lassen uns von der Sonne blenden oder sehen die Straßenlaterne.

Es sei denn, wir sagen, dass alles, was wir sehen, Licht sei: Wir sehen nicht das Buch vor uns, sondern Licht, das von dort in unsere Augen fällt. Damit haben wir allerdings unsere bunte Welt verloren, sie wird wegdefiniert, sie verliert ihre Realität. Die einzige Realität, von der wir mit dem Auge Kunde erhalten, ist dann das Licht.²

²Auf die erkenntnistheoretische Diskussion zur Problematik Wahrnehmung und Wirklichkeit soll hier nicht

Aber was das Licht nun sei, damit hat die Physik die größten Schwierigkeiten. Gerade die moderne Physik gibt die Vorstellung von einer naiven Realität des Lichtes auf zugunsten einer Betrachtung, die nur Sender und Empfänger kennt und über die Ereignisse dazwischen lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen macht.

Mit unseren Vorschlägen zur Behandlung der Optik im Physikunterricht wollen wir dem Sehen der Welt da draußen seinen gebührenden Platz einräumen. Das sehende Auge und die Dinge – also Empfänger und Sender – sind die entscheidenden Größen, und um die Aufklärung der Beziehungen zwischen dem Gesehenen und den Dingen wird es uns gehen.

1.1.1 Bevor es losging

Bei der Erprobung dieser Unterrichtseinheit ergab sich unmittelbar vor Unterrichtsbeginn durch eine zufällige, aber eigentlich ganz alltägliche Erfahrung eine reizvolle Hinführung zur Optik:

Das herrliche Sonnenwetter draußen zaubert helle Flecken und schemenhafte Schatten an Wände und Decke des Physikraumes. Einige haben ihren unverrückbaren Ort, andere huschen über die Decke, von links nach rechts, von rechts nach links. Die bewegten Flecken sind deutlicher, und das Fenster mit seinem breiten Kreuz ist gut erkennbar. Der Straßenverkehr vor den beiden Fenstern ist nicht zu überhören.

Eine Schülerin schaut nach draußen und berichtet: Ein Auto fährt vorbei und blendet mich mit einer Spiegelung der Sonne. Im selben Moment sehen wir das Fensterbild mit dem Schatten der Schülerin über die Wände flitzen. In welcher Richtung fuhr das Fahrzeug? Nach links! Der Schatten machte genau die Gegenbewegung. Jetzt kommt ein weißes Auto von rechts. Tatsächlich: ein heller Schein flitzt von links nach rechts durch den Raum. Ein dunkelblauer Wagen lässt dagegen nur einen schwachen Schein über die Decke laufen.

Die spontane Beobachtung – ohne Hilfen oder Kommentare meinerseits³ – durch einen Schüler erklärt, indem er auf den Zusammenhang zwischen den bewegten Lichtflecken und der Bildentstehung bei der Lochkamera hinweist.

1.1.2 Der Blick in die Spiegelwelt

Es mag etwas ungewöhnlich sein, im Physikunterricht der Oberstufe an den Beginn der Unterrichtseinheit zum Thema Spiegel die Rezitation eines Gedichts zu stellen. Wir haben diesen

eingegangen werden. Eine gründliche Auseinandersetzung (aus konstruktivistischer Sicht) findet man beispielsweise bei Watzlawik [Wat81]. Ein unmittelbarer Bezug dieser Diskussion zu Fragen der Bildung wird bei Rauschenberger [RS89] hergestellt.

³Es sei hier erlaubt, die Lehraktivität in Ichform zu beschreiben. Es entspricht dies der geschilderten Unterrichtssituation besser als "der Lehrer ...". Zugleich kommt darin zum Ausdruck, dass hier eine sehr offene Lernsituation entstand, die den Lehrer zum Beteiligten und nicht zum Belehrenden machte.

Weg gewählt, um die Schüler zu öffnen für Eindrücke und Erfahrungen, die sich nicht auf die Wiedergabe des in der Mittelstufe Angelernten beschränken. Im Gedicht von Christian Morgenstern wird eine nicht ganz leicht zu verstehende Situation am Spiegel geschildert, die zum Ausprobieren, also zur Handlung auffordert; in der "Anmerkung", die Morgenstern dem "Lied" beigefügt hat, wird dazu eine ausführliche "Versuchsanleitung" gegeben.

Christian Morgenstern

Das Lied vom blonden Korke

Ein blonder Korke spiegelt sich
in einem Lacktablett.

Allein er sah' sich dennoch nicht,
selbst wenn er Augen hätt'.

Das macht dieweil er senkrecht steigt
zu seinem Spiegelbild.

Wenn man ihn freilich seitwärts neigt,
zerfällt, was oben gilt.

Oh Mensch, gesetzt, du spiegelst dich
im, sagen wir, im All!

Und senkrecht! – Wärest du dann nich
ganz im demselben Fall?

Anmerkung: Wer dieses Lied nicht sogleich begreift, der nehme einen Kork, versehe ihn unten mit etwas erweichtem Bienenwachs, und drücke ihn gegen den nächstbesten Wandspiegel, so daß er auf dessen Fläche kleben bleibt. Hierauf rücke er sich einen Sessel davor, setze sich und "fühle" sich nun in die Sache "ein".

(aus: Galgenlieder)

Wir folgen Morgensterns Anregung, legen einen Spiegel (Lacktablett) auf den Boden und stellen einen Sektkorken darauf. Einzelne gehen zum Spiegel und überprüfen, was wohl der Korke sähe, wenn er Augen hätte. Tatsächlich: er sähe sich selbst nicht, auch das Neigen des Kopfes reicht noch nicht, erst wenn man sich beugt, kann man sich selber sehen.

Bald steht eine ganze Gruppe dicht um den Spiegel und schaut nach unten: Der Blick geht tief hinunter, und wir sehen uns kopfüber nach unten hängen. Ist der Kopf dort unten nicht viel weiter unter unseren Füßen als der wirkliche Kopf über diesen?

Das kann doch gar nicht sein, sagen die "Physiker"! Aber ich sehe es doch so, wird diesen entgegnet. Ja, wir sind es eben nur nicht gewohnt, nach unten schauend Entfernungen zu schätzen. Sofort kommt ein Vorschlag zur Überprüfung: Der Spiegel wird aufgerichtet, ein Schüler liegt am Boden

mit den Füßen am Spiegel, hebt den Kopf und schaut sich im Spiegel an. Obwohl einige diese Lage probieren, sind wir nicht ganz sicher, ob tatsächlich Kopf und Spiegelkopf gleichweit vom Spiegel entfernt sind.

Die sogenannte Mondtäuschung – dicht am Horizont erscheint der Mond viel größer als hoch oben am Himmel, obwohl beide von derselben Streichholzspitze verdeckt werden können! – ist ein eindrucksvolles Beispiel aus dem Alltag, das deutlich macht, dass die menschliche Größen- bzw. Entfernungswahrnehmung tatsächlich nicht eindeutig ist, sondern – wie in diesem Fall – von der Blickrichtung abhängt⁴.

Der Spiegel steht bereits vertikal am Boden. Vor ihn wird ein großes Blatt weißes Papier gelegt, das im Spiegel weiterzugehen scheint. Der Raum wird jetzt verdunkelt, und ich zünde eine Kerze an. Langsam nähere ich mich dem Spiegel und setze die Kerze vorsichtig auf das Papier. Sie wird seitlich hin und her geschoben, mal näher zum Spiegel, mal weiter weg. Schweigend schauen alle zu. Eine zylindrische, hohe Vase wird neben die Kerze gestellt. Auch sie wird langsam in verschiedene Positionen gebracht, mal nah bei der Kerze, neben, vor und dahinter (Abbildung 1.1).

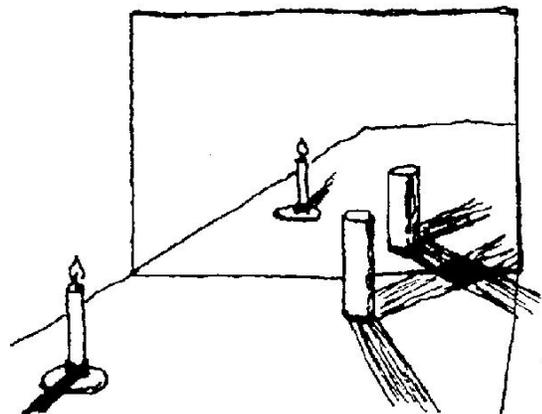


Abbildung 1.1: Kerze und Spiegelkerze erzeugen an der Vase verschiedene Schatten

"Am meisten hat mich überrascht, dass die gespiegelte Kerze einen Schatten von der Vase vor dem Spiegel wirft!" ist die erste Äußerung, die das Schweigen bricht. Sofort kommt ein lebhaftes Gespräch in Gang: Der Schatten der gespiegelten Vase, der von der gespiegelten Kerze gemacht wird, fällt bis in die wirklich Welt vor dem Spiegel! Umgekehrt fällt der Schatten der "echten" Vase in die "Spiegelwelt" hinein.

Wie kommt es zu dem viereckigen, fast schwarzen Schatten nahe am Spiegel? "Da schneiden sich doch zwei Schatten: Schatten plus Schatten gleich schwarzer Schatten!" Widerspruch: "Kein Licht und kein Licht kann doch nicht noch weniger Licht geben?!" "Nein, dort scheint weder die Kerze noch die gespiegelte Kerze hin, darum ist es dort finster!"

"Ja, und darum sind einige Schatten auch heller als andere: *eine* der beiden Kerzen leuchtet eben doch noch dahin!"

⁴Die Mondtäuschung beruht auf einer unterschiedlichen Entfernungswahrnehmung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung: Je größer der Winkel zwischen Blickrichtung und Horizontale ist, desto kleiner schätzen wir den Abstand des beobachteten Objektes. Bei gegebenem Sehwinkel erscheint uns deshalb der Mond am Himmel kleiner als am Horizont [Sch93a].

Aus der Beobachtung, dass selbst die Kerze einen Schatten wirft, entsteht die Frage, ob auch die Flamme der Kerze einen Schatten wirft. Fast die ganze Gruppe ringt um eine Lösung dieser Frage, experimentell und theoretisch. Der Aufbau wird verändert, und es wird gezielt nach dem Schatten, den die gespiegelte Kerze von der wirklichen auf das Papier wirft, gesucht. Der Schatten der Flamme muss in Höhe der beiden Flammen sein, also wird dorthin ein Schirm gehalten und mit dem Auge gepeilt. Auf experimentellem Weg wird keine Lösung gefunden. Das Nachdenken lässt einen Schatten erwarten: Wenn Flamme und Spiegelflamme genau in einer Linie stehen, ist von dort aus nur eine Flamme, nämlich die "echte" zu sehen, etwas seitlich davon jedoch beide Flammen, also müsste es dort heller als in der Verlängerung der Verbindungslinie sein.

1.1.3 "Der Ebene Spiegel ist ein Fenster in die Spiegelwelt"

Mit dem Verschieben der Kerze oder der Vase seitlich über den Rand des Spiegels hinaus setze ich einen weiteren Impuls. Warum wirft die Vase noch Schatten, obwohl sie doch gar nicht mehr vor dem Spiegel steht?

"Wir sehen von hier noch die Spiegelkerze, die diesen Schatten erzeugt", ist die Antwort einiger Schülerinnen und Schüler. Sie sitzen auf der gegenüberliegenden Seite.

Die Kerze wird nun an ganz verschiedenen Stellen im Raum gebracht, und dann wird nach der "Spiegelkerze" gesucht. Auch wenn nicht alle die "Spiegelkerze" sehen können, so ist sie doch da, nämlich drüben in der "Spiegelwelt". Dazu muss sich die Kerze allerdings *vor* der Spiegelebene – das ist die Ebene, die durch allseitige Vergrößerung des Spiegels entstehen würde – befinden.

"Spiegelwelt", dieses Stichwort löst eine Diskussion über den Realitätsgehalt dieser sichtbaren Welt aus. Ist sie tatsächlich räumlich oder nicht doch ein flaches Bild auf dem Spiegel? Mit einer zweiten, gleichen Kerze und einer weiteren Vase wird die Szene hinter dem Spiegel so aufgebaut wie vor ihm. Dann wird der Spiegel langsam entfernt. Tatsächlich ist der Raumeindruck gleich, und die Schatten verlaufen ebenso wie zuvor in der Spiegelwelt. Die Spiegelwelt ist so räumlich wie die wirkliche Welt: "Der Spiegel ist ein Fenster in die Spiegelwelt!"

1.1.4 Eingriff in die Spiegelwelt

"Ist die Spiegelkerze *genau* so weit vom Spiegel entfernt wie die richtige Kerze?" Als Impuls lege ich einen Zollstock von der Kerze zum Spiegel, zugleich liegt damit ein Zollstock in der Spiegelwelt (Abbildung 1.2 auf der nächsten Seite). "10, 20, 30 cm steht die Kerze vor dem Spiegel und 10, 20, 30 cm steht die Spiegelkerze hinter dem Spiegel!" lese ich am Zollstock und dem gespiegelten Zollstock ab. Dieser einfache und einsehbare Messvorgang löst eine heftige, geradezu unversöhnliche Diskussion unter den Mitschülern aus, die sich in Gegner und Befürworter der Messung spalten. So darf man doch nicht messen! Woher haben wir die Sicherheit, dass der Maßstab auch in der

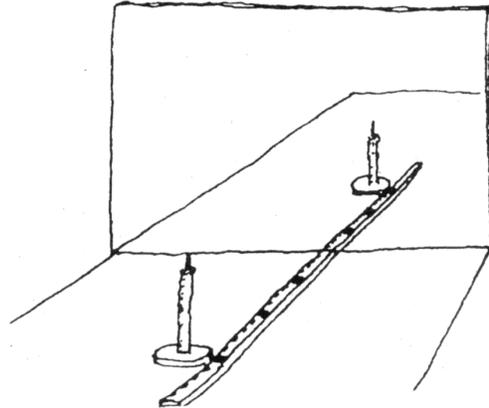


Abbildung 1.2: Der Abstand zwischen Kerze und Spiegelkerze kann mit einem Zollstock gemessen werden

Spiegelwelt korrekt ist⁵? Die Befürworter weisen auf die sichtbare und völlig normale Perspektive des Maßstabes hin: Jedes Objekt wird doch "nach hinten" schmaler! Aber, ist die Perspektive wirklich genau gleich oder nur ungefähr? Reich der visuelle Eindruck aus?

Es bleiben grundsätzliche Zweifel: Das Spiegelbild ist doch nicht wirklich da, kann es dann überhaupt einen Abstand haben⁶? Was ist überhaupt Wirklichkeit? ...

Ich schlage eine Unterscheidung zwischen einer Wirklichkeit, die uns mit den Augen zugänglich ist, und einer Wirklichkeit, die uns mit dem Tastsinn zugänglich ist, vor:

Die Spiegelwelt ist nur eine "Sehwelt" und keine "Tastwelt".

Nach längerer Diskussion können wir uns einigen:

Die Dinge in der Spiegelwelt befinden sich soweit hinter dem Spiegel, wie die wirklichen Dinge vor dem Spiegel sind.

Als dieses Spiegelgesetz als Bild (in Draufsicht) an der Tafel entsteht, entdecken einige Schüler sofort das aus der Mittelstufe bekannte Reflexionsgesetz: Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel.

Insbesondere weil über den "Realitätsgehalt" der Spiegelwelt so heftig diskutiert wurde, bildete das Gedicht von Conrad Ferdinand Meyer einen geeigneten Abschluss dieser Unterrichtseinheit. Auf diese Weise wurde noch einmal die Brücke von der Physik hin zur alltäglichen Wahrnehmung, hier überhöht durch das Gedicht geschlagen:

⁵Im Hohl- und im Wölbspiegel sieht das Bild des Maßstabes nicht mehr nach "normaler" Perspektive aus. Dort wird man nicht so einfach messen dürfen.

⁶Man kann einen zweiten, identischen Maßstab so hinter den Spiegel legen, dass er bei etwas seitlicher Beobachtung mit dem gespiegelten teilweise zur Deckung kommt.

Conrad Ferdinand Meyer

Möwenflug

Möwen sah um einen Felsen kreisen
Ich in unermüdlich gleichen Gleisen,
Auf gespannter Schwinge schweben bleibend,
Eine schimmernd weiße Bahn beschreibend,
Und zugleich im grünen Meeresspiegel
Sah ich um die selben Felsenspitzen
Eine helle Jagd gestreckter Flügel
Unermüdlich durch die Tiefe blitzen.
Und der Spiegel hat solche Klarheit,
daß sich anders nicht die Flügel hoben
Tief im Meer, als hoch in Lüften oben,
Daß sich völlig gleichen Trug und Wahrheit.

Allgemach beschlich es mich wir Grauen,
Schein und Wesen so verwandt zu schauen,
Und ich fragte mich, am Strand verharrend,
In gespenstisches Geflatter starrend:
Und du selber? Bist du echt beflügelt?
Oder nur gemalt und abgespiegelt?
Gaukelst Du im Kreis mit Fabeldingen?
Oder hast du Blut in deinen Schwingen?

Wir haben in dieser Unterrichtseinheit die Komplexität des Phänomens nicht durch abstrakte Vereinfachungen ersetzt, sondern diese möglichst lange bewahrt. Und trotzdem haben wir verstanden!

Die offene Situation, die durch wenige Impulse hergestellt war, und die Ruhe, mit der alle Überlegungen und Vorschläge in der Gruppe diskutiert und erprobt wurden, sind Voraussetzungen für diese Art des Verstehens.

1.1.5 Hohl- und Wölbspiegel

Für diesen Unterrichtsabschnitt haben wir schon vor einiger Zeit einen veränderbaren Wölb- und Hohlspiegel entwickelt, über den bereits an anderer Stelle berichtet wurde [Sch84]. Wie in der vorangegangenen Unterrichtseinheit ist es auch hier unser Ziel, die Schülerinnen und Schüler mit einer Wahrnehmung zu konfrontieren, die an sich (fast) alltäglich ist, die jedoch

durch Verfremdung wieder *frag-würdig* wird. Hierzu eignet sich der genannte Folienspiegel, weil er nicht ein starrer Wölb- bzw. Hohlspiegel ist, sondern weil sein Krümmungsradius, d.h. seine Brennweite kontinuierlich verändert werden kann. Auf diese Weise werden aus den bekannten statischen Spiegelbildern dynamische Bilder.

Entstehung der Spiegelfläche

Der Spiegel besteht aus einer versilberten dünnen Folie, die über einen kreisförmigen Ring gelegt ist und gleichmäßig gespannt werden kann. Wenn zunächst der ungespannte Spiegel gezeigt wird, ist die schlaffe und faltenreiche Folie als silbrige Oberfläche zu erkennen. Wird dann die Folie gestrafft, werden deutliche Bilder sichtbar, die sofort als Spiegelbilder erkannt werden. Vermutlich muss darauf erst aufmerksam gemacht werden: Zunächst hat der Beobachter die knitterige Oberfläche im Blick, also den Blick auf den Ort des Spiegels fixiert. Wenn dann das Spiegelbild sichtbar wird, schaut er in einen Raum, fixiert also einen anderen Tiefenbereich als zuvor. Dabei wird, wenn die Spiegelfläche störungsfrei ist, diese völlig unsichtbar. Mackensen hat diese Beobachtungen auf eine fast lyrische Formel gebracht – *Greifbares wird unsichtbar, Sichtbares wird ungreifbar* –, deren Gehalt mit Oberstufenschülern durchaus diskutiert werden kann [Mac82].

Wölbspiegel

Hinter der Spiegelfolie befindet sich ein Hohlraum, in den Luft eingeblasen werden kann. Dadurch wölbt sich die Folie langsam zunehmend nach vorn. Der "Seinhalt" im Spiegel nimmt dabei zu: Der Beobachter sieht vom Rand her mehr und mehr Dinge "in den Spiegel kommen", die immer kleiner werden und sich zunehmend zu entfernen scheinen. Eine breite Messlatte vor dem Spiegel macht es besonders deutlich: In dieser Spiegelwelt laufen Parallelen – anders als beim ebenen Spiegel – schneller aufeinander zu, als in der realen Welt. Die Perspektive ändert sich: Das Unendliche rückt näher ran, es scheint einen endlichen Abstand hinter der Spiegelfläche zu haben! Wo ist das Bild? Ist es, wie der erste Eindruck uns glauben macht, wirklich weiter weg? Oder doch näher dran? Die notwendige Entscheidung löst meist eine intensive Auseinandersetzung mit dem Phänomen aus. Wenn der Beobachter sich ein wenig bewegt⁷, stellt fest:

In der Wölbspiegelwelt sind die Bilder dichter hinter der Spiegelfläche als beim ebenen Spiegel.

Es kann an dieser Stelle im Unterricht auf eine genaue Analyse verzichtet werden, weil darauf

⁷Mit der "Kopfwackeltechnik" kann der Beobachter die relative Entfernung zweier Objekte bestimmen: Der fernere der beiden Gegenstände bewegt sich in Richtung der Kopfbewegung mit. Gleichweit entfernte Dinge behalten ihre relative Position bei.

im Abschnitt "Geometrische Optik" eingegangen werden soll, nachdem die Konstruktionsvorschriften für Lichtwege erarbeitet wurden.

Hohlspiegel

Wird die Luft aus dem Hohlraum des Spiegels langsam abgesaugt, wölbt sich die Folie nach innen; der Hohlspiegel entsteht. Jetzt sieht sich der Betrachter langsam größer werdend: Rückt das Bild näher? Dann schwimmt sein Spiegelbild und ist bei noch stärkerer Wölbung nach innen bald wieder zu sehen, dann allerdings kopfstehend/seitenverkehrt und wieder kleiner werdend. Der Maßstab zeigt nun (im Nahbereich) das umgekehrte Verhalten: In der Hohlspiegelwelt laufen die Parallelen nicht zusammen, sondern auseinander! Hier scheint das Unendliche noch ferner zu sein als in der normalen Welt. Weil sich diese Parallelen sogar **hinter** (!! dem (realen) Beobachter schneiden können, scheint das Unendliche wieder im Endlichen zu liegen, aber auf der "falschen" Seite⁸!

Mit einem kleinen Gegenstand, der am Bildort aufgestellt wird, findet man (wieder mit der "Kopfwackelmethode"): Bei einem stark gewölbten Hohlspiegel erscheint das kopfstehend/seitenverkehrte Bild zwischen Beobachter und Spiegel. Dieses Bild kann auf einem Schirm aufgefangen werden.

Damit diese geradezu irritierenden Eigenschaften des Hohlspiegels nicht zu einer Verwirrung führen, sollten den Schülerinnen und Schülern viel Zeit für eigene Erfahrungen gelassen werden. Wenn diese Erfahrungen präzise formuliert werden, ist bereits viel gelernt worden. Die konstruktive Analyse erfolgt auch hier erst später.

1.2 Geometrische Optik

Nachdem im ersten Teil das Sehen Ausgangspunkt unserer Überlegungen war, wollen wir in diesem Teil im Sinne eines Spiralcurriculums uns ein zweites Mal dem Spiegel zuwenden, wobei nun die Ausbreitung des Lichtes genauer untersucht werden soll.

Das konstituierende Phänomen der geometrischen Optik ist die geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Zugleich ist diese aber mit der alltäglichen Erfahrung des Sehens so eng verbunden, dass es schwierig ist, diesen wichtigen Sachverhalt Schülern gegenüber zu problematisieren. Wir wollen im Unterricht hierzu nicht – wie oft die Regel – schmale Lichtbündel oder einen Laser"strahl" verwenden, sondern versuchen, den Weg des Lichtes anhand von Schattengrenzen zu verfolgen.

⁸Aus der Mathematik kennen die Schüler ein ähnliches Verhalten von Unstetigkeitsstellen, beispielsweise der Funktion $f(x) = (x - 1)^{-1}$.

1.2.1 Lichtausbreitung

Die Grenzen des Schattens, den ein zylindrischer Körper auf den ebenen Boden wirft, sind gerade, die Lichtbündelgrenzen und damit die Lichtwege sind es somit auch (Abbildung 1.3). Was aber bedeutet "gerade" überhaupt? Wir benötigen zur Überprüfung etwas, das vom Sehen und Leuchten unabhängig ist.

Ein gespannter Faden stellt die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten dar, sein Verlauf wird "gerade" genannt. Der Vergleich mit der Lichtausbreitung zeigt, dass nach dieser Definition auch die Schattengrenzen gerade sind:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten einen geraden Weg.

(Tatsächlich gibt in dieser zweidimensionalen Betrachtungsweise eine Schattengrenze nur die Projektion eines Lichtweges wieder, wahre Lichtwege enden an jeder Stelle der Schattengrenze.)

1.2.2 Reflexion und kürzeste Wege

Der Lichtweg von einer Kerze über einen ebenen Spiegel zu einem Punkt P vor dem Spiegel ist allerdings nicht gerade, sondern hat am Spiegel einen "Knick", wie der Schatten eines zwischen der Kerze und dem Spiegel stehenden Zylinders zeigt. Aber auch hier – wie schon bei der geradlinigen Ausbreitung – gibt es nur genau einen Lichtweg zwischen der Kerze und P über den Spiegel, und dieser ist der kürzeste von allen denkbaren. Dies ist unmittelbar zu sehen an einem zwischen dem Ort der Kerze und P festgehaltenen Faden, den man über den Spiegel spannt und dort hin und her bewegt (Abbildung 1.4).

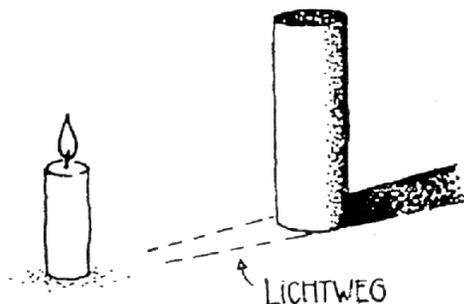


Abbildung 1.3: Lichtweg entlang und in Verlängerung der Schattengrenze

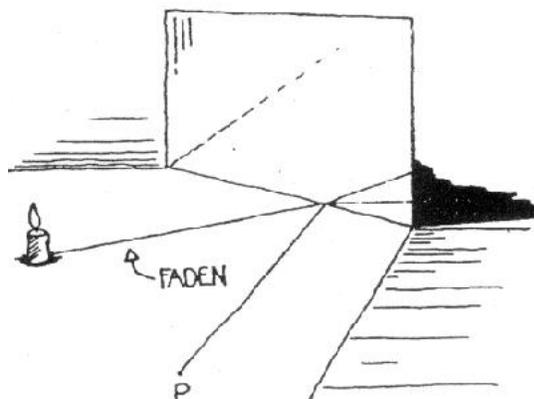


Abbildung 1.4: Gespannter Faden bei der Suche des kürzesten Weges

Dies führt zu der Formulierung des Prinzips des kürzesten Lichtweges:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den kürzesten Weg (im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen).

1.2.3 Gebogene Spiegel

Mit dem nächsten Schritt sollen Lichtwege am gebogenen Spiegel untersucht werden. Die Schüler betreten den Raum, in dem die Stühle in Form eines Halbkreises aufgestellt worden sind. Auf der freien Fläche steht aufrecht ein 30 x 50 cm großer ebener Spiegel, davor eine Kerze. Die Vorhänge werden vor die Fenster gezogen, um den direkten Lichteinfall zu vermeiden, und dann wird die Kerze angezündet. Wir erinnern uns daran, dass im Spiegel ein Bild der Kerze zu sehen ist, und dass diese "Spiegelkerze" genauso weit hinter der Spiegelfläche ist, wie die "richtige" Kerze davor. Dies wird an der gegebenen Situation besonders deutlich:

Die Kerze wirft einen Lichtschein auf dem Boden und der Spiegel in diesem Schein einen Schatten (Abbildung 1.5). Der Ort der Kerze K ist dort, wo sich die rückwärtig verlängerten Grenzen ihres Lichtbündels ($a + b$) schneiden. Doch es ist noch ein zweiter Lichtschein zu erkennen, denn das Licht der Kerze wird am Spiegel reflektiert. Oder, anders gesagt, die Spiegelkerze leuchtet in den Raum vor dem Spiegel. Am Schnittpunkt der Verlängerungen dieser Bündelgrenzen ($c + d$) ist der Ort der Spiegelkerze S . Das ist für die Schüler nicht überraschend, denn die Lichtbündel erscheinen aus der Aufsicht symmetrisch, wie es nach der Lage von Kerze und Spiegelkerze auch zu erwarten war. Neu ist aber, dass ich hier einen Spiegel aus biegsamen Plexiglasmaterial verwendet habe.

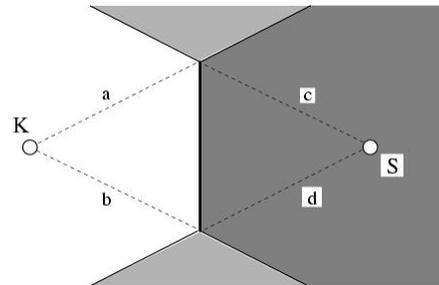


Abbildung 1.5: Ebener Spiegel

Ein Schüler soll nun den Spiegel zunächst nach hinten biegen, die linke und rechte Kante also von uns weg. Hierbei gibt es eine Reihe von Dingen zu beobachten. Besondere Aufmerksamkeit zieht das Bild der Kerze auf sich, denn es wird kleiner. Oder besser, wie sogleich bemerkt wird, es wird schmaler, seine Höhe verändert sich nicht. Zugleich wird der Schein der Spiegelkerze auf dem Boden weiter (Abbildung 1.6). Einige können ihn von ihren Platz aus kaum noch erkennen, denn er ist auch schwächer geworden. Dieser Zusammenhang erscheint vernünftig: Das Licht der Spiegelkerze ist gleich stark geblieben, hat sich aber auf eine größere Fläche verteilt.

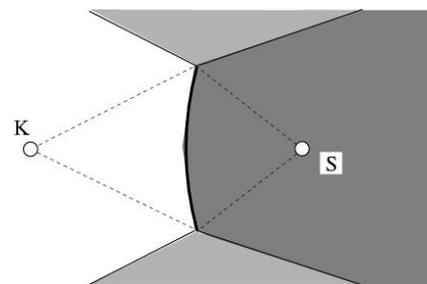


Abbildung 1.6: Konvex gebogener Spiegel

Natürlich, wird bemerkt, die Spiegelkerze ist ja schmaler geworden. Und sie selbst müsste im Spiegel aus einem weiteren Bereich gesehen werden können. Das wird sofort durch die Beobachtung derer, die mehr am Rand sitzen, bestätigt. Wir können es uns aber auch denken, denn nur von dort, wo ihr Schein hinfällt, ist die Flamme der Spiegelkerze auch zu sehen. Wo aber ist jetzt ihr Ort? Wir verlängern mit Messlatten die Bündelgrenzen hinter den Spiegel: Der Schnittpunkt ist nach vorne gerückt, die Spiegelkerze näher am Spiegel als zuvor.

Auch in die andere Richtung können wir den Spiegel biegen. Die Kanten rücken jetzt auf uns zu, und das Lichtbündel der Spiegelkerze wird enger als beim ebenen Spiegel (Abbildung 1.7). Dafür ist es nun aber besser sichtbar, also heller geworden. Der Blick in den Spiegel bestätigt, was wir vermuten: Das Bild der Kerze ist breiter geworden! Außerdem ist zu erkennen, dass die Spiegelkerze sich vom Spiegel nach hinten entfernt hat.

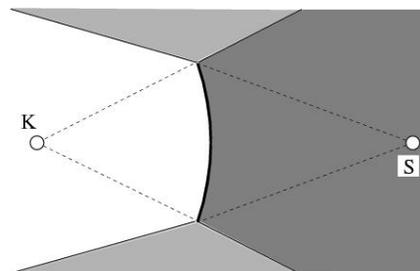


Abbildung 1.7: Leicht konkav gebogener Spiegel

Der Spiegel wird etwas breiter gebogen, und jetzt verlaufen die Grenzen des Lichtscheins parallel zueinander; die Spiegelkerze muss sich unendlich weit entfernt haben. Das bedeutet aber auch, dass man ebenso annehmen könnte, sie befände sich *vor* dem Spiegel.

Wir biegen den Spiegel noch ein klein wenig weiter. Jetzt schneiden sich die Grenzen des reflektierten Lichtbündels vor dem Spiegel.

Die Spiegelkerze ist also auf *unserer* Seite aus dem Unendlichen hervorgekommen (Abbildung 1.8).

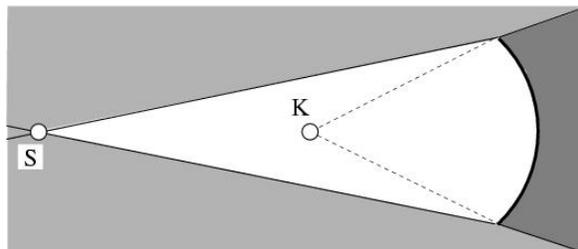


Abbildung 1.8: Stärker konkav gebogener Spiegel

Wir stellen einen weißen Karton an den Ort der Spiegelkerze und sehen auf ihm eine senkrechte, helle Lichtlinie. Einem Schüler, der sein Auge an diese Stelle bringt, erscheint der gesamte Spiegel lichterfüllt.

1.2.4 Lichtwege am gebogenen Spiegel und Intensität

Wir wollen nun, wie schon zuvor am ebenen Spiegel, den Weg des Lichtes verfolgen und beobachten dazu wieder die Schattengrenzen einer zwischen Kerze und Spiegel aufgestellten Papprolle. Die beiden Grenzen darf man sich rückwärtig bis zur Kerze verlängert denken und als Lichtwege interpretieren. Den Lichtweg zwischen der Kerze und einem mit einem Radiergummi markierten Punkt P über den Spiegel (und damit auch die "beteiligte" Stelle des Spiegels) finden wir, indem wir die Papprolle so verschieben, dass eine der beiden Schattengrenzen nach der Reflexion durch

P verläuft. Das fällt nicht schwer, und wir finden, dass es, wie beim ebenen Spiegel, nur *einen* Lichtweg zu P gibt. Und dieser Lichtweg verläuft weiter durch die Spiegelkerze. Dass das kein Zufall ist, wird gleich bemerkt, denn auch die zweite Schattengrenze geht genau zur Spiegelkerze. Schnell verschieben wir die Papprolle. Wo auch immer sie steht, gilt: Solange ihre Schattengrenzen über den Spiegel verlaufen, treffen sie die Spiegelkerze. Es gibt also viele, unendlich viele Lichtwege zwischen Kerze und Spiegelkerze! Sicher, deshalb ist es am Ort der Spiegelkerze auch so viel heller als überall sonst, ist dies ein Ort größerer Intensität.

Doch diese Erfahrung ist auch Anlass für kritisches Nachfragen: Wie kann das Licht so viele Wege nehmen, wenn es doch, wie wir am ebenen Spiegel festgestellt haben, immer den kürzesten wählt? Wir suchen auch hier den kürzesten Weg zwischen Kerze und Spiegelkerze, indem wir einen Faden zwischen ihnen über den Spiegel spannen. Der Schüler, der mit dem Finger den Faden am Spiegel spannt, bewegt den Fadenknick hin und her. Doch anders als beim ebenen Spiegel finden wir keine Stelle, an der der Faden kürzer gespannt werden kann, als über alle anderen Stellen des Spiegels; der Fadenknick bleibt überall am gebogenen Spiegel, hebt sich nicht ab wie beim ebenen. Alle Lichtwege sind gleich lang!

Das ist eine neue Erkenntnis, die uns über das Vermögen eines konkav gebogenen Spiegels, Licht zu sammeln, Aufschluss gibt:

Am gebogenen Spiegel gibt es zwei Punkte, zwischen denen es unendlich viele Lichtwege gibt. Stehen dem Licht mehrere gleichlange (benachbarte) Lichtwege zur Verfügung, so nimmt es all diese.

Dies ist ein Zusatz zum Prinzip des kürzesten Lichtwegs.

1.2.5 Fermat-Prinzip

Betrachtet man Lichtwege zwischen Punkten, die in unterschiedlichen Medien liegen (Luft und Wasser, Luft und Glas), stellt man fest, dass diese nicht gerade sind, das Licht also gebrochen wird. Mit einigen Überlegungen kann man vermuten, dass hierfür unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in den Medien der Grund sein könnten. Es ist weiterhin sinnvoll, an dieser Stelle des Unterrichts eine Messung der Lichtgeschwindigkeit (möglichst in verschiedenen Medien) durchzuführen.

Die Erkenntnisse aus dem Prinzip des kürzesten Lichtweges und dem Brechungsphänomen werden zum Fermat-Prinzip vereinigt:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es, im Vergleich zu denkbaren Nachbarwegen, die kürzeste Zeit benötigt.

1.2.6 Optische Abbildung

Aus dem Fermat-Prinzip können Folgerungen für die Form von lichtsammelnden Linsen gezogen werden, die zur Konstruktion einer Zylindersammellinse (deren Krümmung aber nicht kreisförmig ist) führen.

Im weiteren Unterrichtsverlauf wird mit dem gebogenen Spiegel (und der Zylinderlinse) festgestellt werden, dass aus der hellen Lichtlinie auf dem am Ort der Spiegelkerze aufgestellten Schirm ein auffangbares Bild der Kerzenflamme wird, wenn man nur noch gleichlange Lichtwege zwischen einem Punkt der Kerzenflamme und einem Punkt auf dem Schirm zulässt. Dies gelingt, indem man die unterschiedlich langen Wege über verschiedene Höhen des Spiegels dadurch ausblendet, dass eine Blende mit waagrechttem Schlitz vor den Spiegel gehalten und mit diesem gebogen wird (Abbildung 1.9).

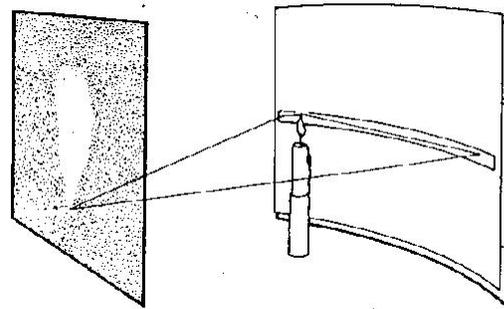


Abbildung 1.9: Reelles Bild der Kerzenflamme

1.3 Weiterführende Optik

1.3.1 Partielle Reflexion

Die Physikstunde beginnt am frühen Morgen, draußen dämmt es, hier im Raum haben wir die Deckenbeleuchtung eingeschaltet. Die Schüler werden gebeten, ihren Eindruck beim Blick aus dem Fenster zu schildern.

Die erste spontane Äußerung bezieht sich auf die unterschiedliche Färbung des Himmels und die Wolken, die schon zu erkennen sind. Eine Schülerin nennt die verschiedenartigen Straßenlaternen. Aber wir können auch unsere eigenen Deckenleuchten, mehrere Reihen Leuchtstoffröhren, erkennen. Das verwundert zunächst niemanden, denn wir wissen, dass deren Licht an der Fensterscheibe reflektiert wird, dass wir die Lampen wie in einem Spiegel sehen. Einen wichtigen Unterschied gibt es aber, wie angemerkt wird: Die Fensterscheibe spiegelt und ist zugleich durchlässig. Man kann die Raumbeleuchtung auch von draußen sehen.

Wir wollen dies in einem Experiment überprüfen und beleuchten eine Glasscheibe mit einer kleinen Lampe. Deutlich ist der Schein der Lampe hinter der Scheibe zu sehen. Aber auch der reflektierte Schein vor der Scheibe ist zu sehen, viel schwächer zwar, aber noch gut zu erkennen.

Interessant ist das Phänomen deshalb, weil wir so etwas in der geometrischen Optik nicht besonders beachtet hatten. Jetzt haben wir eine Situation, in der sich ein Lichtweg in zwei aufspaltet. Das Licht muss sich "entscheiden", ob es weitergeht oder umkehrt. wie umgangssprachlich formuliert wird.

Damit werden unsere Überlegungen auf Fragen nach der Natur des Lichtes gelenkt. Dies hatten wir bislang sorgfältig vermieden und lediglich vom Weg, den das Licht nimmt, gesprochen.

1.3.2 Quantenhafte Wechselwirkung

Um das geschilderte Phänomen, die partielle Reflexion, zu erfassen, müssen wir eine Abänderung oder Erweiterung der bisherigen Sichtweise zulassen. Das wird umso deutlicher, wenn wir ein anderes Phänomen betrachten, zu dem Material vorliegt.

Eine wichtige Frage, die im Unterricht immer wieder von Schülern angesprochen wurde, bezieht sich auf die Wahrnehmung des Lichtes. Damit wir sehen können, muss das Licht in unserem Auge Reize auslösen können. Auch eine Fotoschicht muss auf das Licht reagieren, ebenso eine Fernseh- und eine Videokamera.

Am leichtesten zugänglich ist für uns das belichtete Negativ eines Schwarz/Weiß-Filmes. Das bereitgestellte Negativ wurde gleichmäßig und schwach belichtet, ist also strukturlos grau.

Der Blick durch das Mikroskop offenbart uns aber, dass das Material nicht einfach mit einem Grauschleier überzogen wurde. Leider können nicht alle Schüler gleichzeitig durch das Mikroskop schauen, so dass die Diskussion schon beginnt, während andere noch nicht beobachten konnten. Für die meisten ist es unerwartet, dass der Film "körnig" belichtet wurde. Eigentlich, wird vermutet, müsste doch eine gleichmäßige Beleuchtung für ein gleichmäßiges Grau sorgen. Hier aber sind manche Stellen weiß geblieben, andere schwarz geworden.

Es sieht so aus, als wäre das Licht nur an manchen Stellen angekommen. Und bei stärkerer Belichtung? Dann müssen zunehmend Bereiche, die bislang weiß geblieben sind, schwarz werden. Tatsächlich, dadurch wird das ganze Bild dunkler, wie einige wissen, die einmal ein gerastertes Zeitungsfoto unter der Lupe betrachtet haben.

Rastert der Film also das Bild oder wirkt – "wechselwirkt" – das Licht einmal dort und einmal da?

Wir nehmen die teilchenhafte Wechselwirkung als Hypothese an (später wird sie in einem Experiment zum Photoeffekt bestätigt werden) und überlegen, was das für unsere "Sicht in Licht" bedeutet. Wenn immer dann, wenn Licht wahrgenommen wird, von einer Wechselwirkung einer "Lichtportion", eines sogenannten Photons, mit Materie gesprochen werden muss, sollten wir auch alle bekannten Phänomene in dieser Sichtweise zu beschreiben versuchen. Während wir uns leicht vorstellen können, dass die Ausbreitung des Lichtes auf geraden Wegen dem "Weg des Photons" entsprechen könnte, ist die partielle Reflexion aber viel schwieriger zu verstehen. Warum wird ein Teil der Photonen an der Glasscheibe durchgelassen, ein anderer, kleinerer Teil aber reflektiert? Vielleicht gibt es zwei Arten von Photonen! Solche, die reflektiert, und andere, die durchgelassen werden. Einige Schüler haben sofort die Idee zu einem Experiment. Man müsste die durchgelassenen Photonen durch eine zweite Glasplatte schicken. An dieser dürfte dann kein Licht reflektiert werden.

Das Experiment wird durchgeführt und zeigt, dass (bei jeweils senkrechter Koinzidenz) auch an der zweiten Glasscheibe eine gewisse Lichtmenge reflektiert wird.

Verschiedene weitere Interpretationsversuche werden unternommen, die zum Teil aber nicht in der Diskussion bestehen können. Als Ausweg bleibt, das Ergebnis so anzunehmen, wie es sich uns darstellt: Bei der partiellen Reflexion kann nicht über den Weg *eines* Photons, sondern nur über das Verhalten aller – dem Weg des Lichts – eine Aussage gemacht werden. Bei senkrechtem Einfall wird ein bestimmter Teil (4%) aller Photonen reflektiert. Wir beschränken uns also auf eine Wahrscheinlichkeitsaussage.

1.3.3 Interferenz

Ein weiteres neues Phänomen soll noch Berücksichtigung finden. Wir betrachten hierzu eine in einem vertikalen Drahtrahmen aufgespannte Seifenhaut, die ganz ähnliche Farben wie eine Seifenblase zeigt. Aber die Farberscheinung ist viel regelmäßiger, wie sofort auffällt: Die Farben sind in waagerechten Streifen angeordnet. Während wir beobachten, wird der oberste Streifen im reflektierten Licht ganz dunkel, also durchsichtig. Und breiter wird er auch, das ganze Muster läuft nach unten! Dann aber bilden sich Schlieren und schließlich platzt die Seifenhaut.

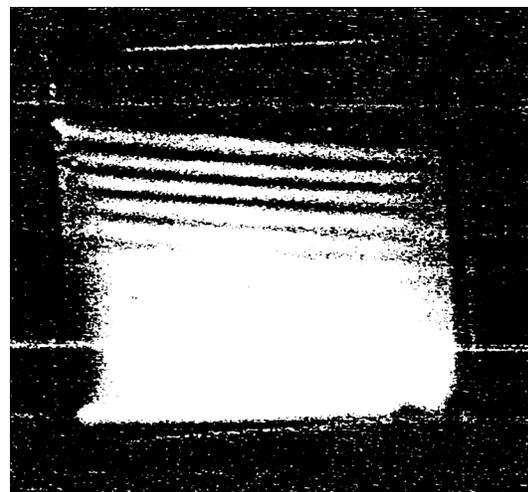


Abbildung 1.10: Interferenzstreifen an der vertikal eingespannten Seifenhaut

Wir überlegen, was das Besondere einer solche Seifenhaut ist. Das Phänomen zeigt eine sich ändernde Struktur von unten nach oben, also scheint es sinnvoll, einen Schnitt durch die Seifenschicht zu betrachten. Zunächst wird angenommen, die Schicht müsse man sich wie eine dünne Glasscheibe vorstellen. Aber die Wirkung der Schwerkraft zieht die Seifenlösung sicher nach unten, so dass sich eine keilartige Schicht ausbilden müsste. Sogleich wird bemerkt, dass dann die Bildung der farbigen Streifen mit der Dicke der Seifenhaut zusammenhängen könnte. Aber wie könnte die Dicke eine Rolle spielen?

Offenbar gibt es an der Seifenhaut wie an der Glasscheibe partielle Reflexion. Aber wo eigentlich? Sicher an der Seite, wo das Licht auftrifft, an der "Vorderseite" also. Ein Schüler erinnert sich an ein Experiment aus der geometrischen Optik, mit dem gezeigt wurde, dass das Licht an der Grenzfläche Luft-Wasser nicht nur von außen in das Wasser eindrang und dabei gebrochen wurde, sondern zu einem Teil auch reflektiert wurde. Das entspricht unserer Aussage über die partielle Reflexion. Aber, bemerkt eine anderer Schüler, wenn man eine Lampe in das Wasser brachte, konnte man erkennen, dass auch beim Austreten des Lichtes ein Teil reflektiert wurde. Wir müssen also beide Grenzflächen der Seifenhaut berücksichtigen. Und das bedeutet auch, dass es zwischen

der Lichtquelle und einem Punkt *zwei* Lichtwege über die Seifenhaut gibt. Diese Erkenntnis soll den Schlüssel zum Verstehen der Farberscheinung darstellen? Aber doch, fällt plötzlich auf, die Farben der Seifenschicht ändern sich mit ihrer Dicke und die Länge der beiden Lichtwege ist auch jeweils um diese Dicke (oder eigentlich um das Doppelte) verschieden! Was aber hat die Farbe mit der Lichtwegdifferenz zu tun?

Wir betrachten daraufhin die Seifenhaut in einfarbigem Licht. Es erscheinen dann helle und dunkle Streifen (Abbildung 1.10 auf der vorherigen Seite). Wir ändern die Farbe, und der Abstand der Streifen ändert sich auch. Also muss der periodische Wechsel von Helligkeit und Dunkelheit etwas mit einer periodischen Veränderung der "Wirkung" der Lichtwegdifferenz zu tun haben.

Lässt sich das Phänomen noch mit anderen Experimenten zeigen? Vorbereitet wurde ein Michelson-Interferometer, womit zugleich die charakteristische Weglängendifferenz, die Basislänge λ des verwendeten roten Laserlichtes bestimmt wird. Die Interpretation dieses Experimentes ist außerdem einfacher, da mit dem aufgeweiteten Laserlichtbündel eine punktförmige Lichtquelle zur Verfügung steht und ebenso ein Punkt auf dem Schirm zur Betrachtung herangezogen werden kann.

Gemeinsam einigen wir uns auf folgende Formulierung:

Stehen dem Licht zwei (oder mehrere) Wege zwischen zwei Punkten zur Verfügung, so kommt es je nach der Differenz der Lichtwege zu Auslöschung oder Verstärkung.

Das beschriebene Phänomen wird *Interferenz* genannt.

1.3.4 Zeigerformalismus

Da Lichtintensitäten nicht einfach addiert werden dürfen, müssen wir zu einer neuen Beschreibung kommen. Diese sollte ebenfalls die teilchenhafte Wechselwirkung berücksichtigen.

Wir erinnern uns an die Weise, in der vektorielle Größen addiert werden und versuchen auch hier eine ähnliche Beschreibung. Dazu werden Zeige gezeichnet und graphisch addiert. Die Winkeldifferenz der Zeiger muss dabei durch die Lichtwegdifferenz bestimmt werden. Die Zeigersumme (eigentlich: deren Quadrat) könnte dann das Maß für die erhaltene Intensität, also für die Wahrscheinlichkeit des Registrierens eines Photons sein.

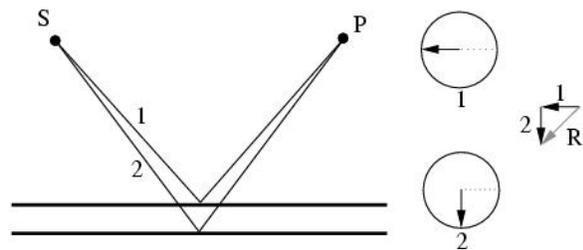


Abbildung 1.11: Addition der Zeiger für zwei Lichtwege an zwei Grenzflächen

Deutlich wird auch hier wieder, dass nicht vom **Weg** eines Photons gesprochen werden darf. Maßgeblich für die Wechselwirkung ist das Zusammenwirken der Lichtwege.

Die neue Sichtweise soll schließlich anhand einer vorgestellten, zusammenfassenden Beschreibung nach Feynman diskutiert werden [Fey88]:

Zeigerformalismus (vgl. Abbildung 1.11 auf der vorherigen Seite)

- (a) Bei mehreren Lichtwegen von einer Lichtquelle zum Empfänger müssen alle Wege berücksichtigt werden, um das richtige Ergebnis für die Intensität zu erhalten.
- (b) Dabei trägt jeder Lichtweg vom Betrag gleich viel zum Ergebnis bei.
- (c) 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.
- (d) Die Länge des Zeigers wird so gewählt, dass das Quadrat die Wahrscheinlichkeit angibt, am Empfänger ein Photon zu registrieren.
- (e) Um das Gesamtergebnis zu erhalten, müssen zunächst alle Zeiger wie Vektoren addiert werden. Anschließend wird die Resultierende quadriert.

1.3.5 Hinführung zur Beugung

Im weiteren Unterrichtsverlauf muss noch eine Reihe von Fragen, die sich im Zusammenhang mit dem Zeigerformalismus ergeben, besprochen werden. Insbesondere muss noch die Frage beantwortet werden, wieso die Seifenhaut kurz vor dem Zerplatzen oben dunkel wurde. Auch muss veranschaulicht werden, wieso das Quadrat des reflektierenden Zeigers als Maß für die Intensität interpretiert wird⁹. Zu den Beugungsphänomenen gelangt man, wenn man die Berechnung nicht nur auf solche Lichtwege, die nach der geometrischen Optik zulässig sind, beschränkt. Die Notwendigkeit hierzu erkennt man zum Beispiel beim Betrachten einer Kerzenflamme durch den Daumenspalt: Die dann entstehenden zusätzlichen Flämmchen lassen sich geometrisch-optisch nicht beschreiben [Wag70].

1.3.6 Reflexion

Auch bei der Reflexion am ebenen Spiegel darf der Lichtweg, der sich nach dem Fermat-Prinzip in der geometrischen Optik ergibt, also nicht einfach als richtig angenommen werden. Dieses Problem soll deshalb im folgenden kurz untersucht werden¹⁰.

Um im Fall der Reflexion die Intensität des von der punktförmigen Lichtquelle S kommenden Lichtes in P (zum Beispiel einer Stelle auf einem Schirm) zu berechnen, müssten eigentlich

⁹Eine ausführliche Darstellung ist zu finden in: [Erb94]

¹⁰Dieses Beispiel ist entnommen: [Erb95]

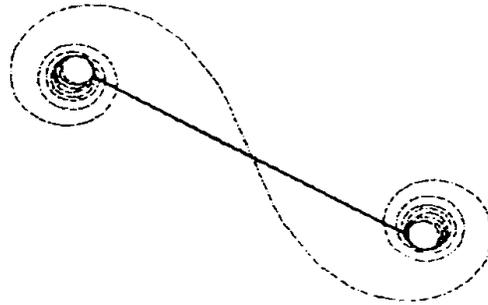


Abbildung 1.12: Zeigeraddition

(wie im Zeigerformalismus vorgesehen) **alle** Wege, d.h. unendlich viele Wege über verschiedene Punkte des Spiegels berücksichtigt werden. In der Praxis genügt aber eine Auswahl, deren Zeiger von einem Computerprogramm berechnet und addiert werden.

Für das in Abbildung 1.12 zu sehende Ergebnis wurden die Zeiger von Lichtwegen über 500 Punkte, die in gleichem Abstand auf einer Linie über einem 1 cm breiten Spiegel liegen, addiert. In diesem Beispiel liegen Lichtquelle und Empfänger dicht nebeneinander jeweils 5 m vor dem Spiegel und λ beträgt 633 nm.

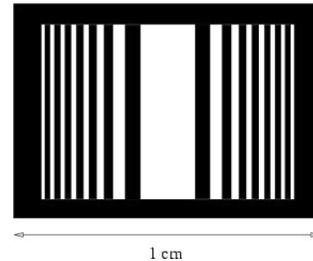


Abbildung 1.13: Gitter

Der resultierende Zeiger ist fett gezeichnet, der Zeiger für den Lichtweg, der sich nach der geometrischen Optik ergibt, liegt in der Spiralenmitte. Man erkennt, dass die Intensität im wesentlichen durch diesen Lichtweg und durch einige benachbarte zustände kommt, womit die Aussage des Fermat-Prinzips in der geometrischen Optik gut bestätigt ist. Die Intensität würde aber noch größer sein, wenn diejenigen Lichtwege *nicht* beitragen würden, deren Zeiger in die andere Richtung weisen.

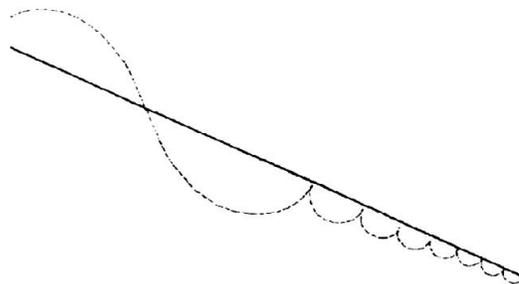


Abbildung 1.14: Zeigeraddition nach Einbringen eines Gitters

Wir haben ein Gitter, das nach einer Idee von Feynman solche Lichtwege ausblendet, für einen 1 cm breiten Spiegel berechnet, vergrößert gezeichnet und fotografiert, um das Dia zur Bedeckung des Spiegels zu verwenden (Abbildung 1.13 auf der vorherigen Seite).

Die Addition der Zeiger der verbleibenden Lichtwege führt nach der Berechnung zu einer erhöhten Intensität, wie das Ergebnis in Abbildung 1.14 auf der vorherigen Seite zeigt (Ausschnitt; bei gleichem Maßstab wie in Abbildung 1.12).

Im Experiment, bei dem zur Beleuchtung das aufgeweitete Lichtbündel eines Lasers verwendet wurde, ist auf dem Schirm an der betreffenden Stelle eine Linie zu erkennen, deren Helligkeit deutlich größer als die Ausgangshelligkeit des ohne Gitter beleuchteten Schirms I_0 ist. Dies ist auch in der Abbildung 1.15 zu erkennen, die die gemessene Intensität auf dem Schirm wiedergibt.

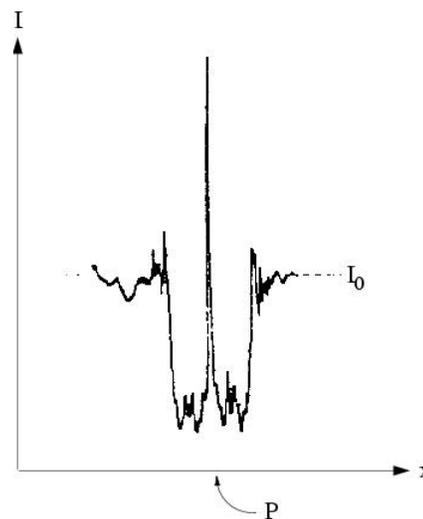


Abbildung 1.15: Addition der Zeiger für zwei Lichtwege an zwei Grenzflächen

Das Beispiel veranschaulicht somit, wie auf der Basis der Betrachtung von Lichtwegen mit einem im Prinzip einfachen Formalismus und dem Computer als Rechenhilfe eine Reihe interessanter Probleme betrachtet werden kann.

1.3.7 Weitere Inhalte

Im weiteren Unterrichtsverlauf wird ein Experiment zum Photoeffekt die Interpretation der Wechselwirkung mittels Photonen bestärken. Das Phänomen der Lichtpolarisation ist bislang noch nicht berücksichtigt worden. Wir schlagen vor, es erst zu behandeln, wenn nach der Schwingungslehre auch das Wellenbild des Lichtes als klassisches Modell erwähnt wird.

1.3.8 Schluss

Ein weiter Bogen ist mit diesem Unterrichtsvorschlag geschlagen worden. Vom Sehen bis zum abstrakten Formalismus. Dieser Weg von der alltäglichen Wahrnehmung zum mathematischen Begriff ist beschwerlich, aber lobenswert, denn er stellt einen Zusammenhang zwischen ihnen her, der in vielen Unterrichtsvorschlägen verloren gegangen ist. Zugunsten dieses Vorgehens haben wir die sonst üblich Stofffülle erheblich beschnitten. Dafür konnten wir uns Schritt für Schritt ohne "eine Menge von Dingen ..., wovon weder im Himmel noch auf der Erde etwas vorkommt" dem modernen Weltbild der Physik nähern.

”Ein etwas vorschnippischer Philosoph, ich glaube, Hamlet, Prinz von Dänemark, hat gesagt, es gäbe eine Menge Dinge im Himmel und auf der Erde, wovon nichts in unseren Compendiis steht. Hat der einfältige Mensch, der bekanntlich nicht recht bei Trost war, damit auf unsere Compendia der Physik gestichelt, so kann man ihm getrost antworten: Gut, aber dafür stehen auch wieder eine Menge von Dingen in unseren Compendiis, wovon weder im Himmel noch auf der Erde etwas vorkommt.”

(Lichtenberg)

Literaturverzeichnis

- [BSS94] BACKHAUS, U. ; SCHLICHTING, H.-J. ; SCHÖN, L.: *Physikbuch 5/6 – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für die 5. und 6. Jahrgangsstufe an Real- und Gesamtschulen*. Frankfurt : Diesterweg, 1994
- [BSS95] BACKHAUS, U. ; SCHLICHTING, H.-J. ; SCHÖN, L.: *Physikbuch 7/8 – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für die 7. und 8. Jahrgangsstufe an Real- und Gesamtschulen*. Frankfurt : Diesterweg, 1995
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Erb95] ERB, R.: Optik in der Oberstufe. In: *Physik in der Schule* 33 (1995), Nr. 2, S. 51–56
- [ES95] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Lichtwege – zentrales Element unseres Optik-Lehrganges. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge 1994* Bd. 14. Alsbach : Leuchtturm, 1995, S. 224–246
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Lan79] LAND HESSEN: Gymnasiale Oberstufe, Aufgabenfeld III Physik. In: *Kurstrukturpläne des Landes Hessen*, 1979, S. 4–5
- [Mac82] v. MACKENSEN, M.: *Klang, Helligkeit und Wärme – Phänomenologischer Physikunterricht, entwickelt aus Praxis und Theorie der Waldorfschule*. Kassel: 1982
- [RS89] ; RAUSCHENBERGER, H. (Hrsg.) ; SCHINDEHÜTTE, M. (Hrsg.) ; (Veranst.): *Wirklichkeit und Bildung – Dokumentation einer Tagung der Evangelischen Akademie Hofgeismar 4. bis 6. März 1988*. Hofgeismar, 1989

- [Sch81a] SCHÄFER, K.: "Was ist Licht?" Modellvorstellungen vom Licht. In: DER HESS. KULTUSMINISTER (Hrsg.): *Kurse für die gymnasiale Oberstufe – Arbeitshilfen für die Hand des Lehrers im Fach Physik*. Frankfurt, 1981
- [Sch81b] SCHÖN, L.: Modellvorstellungen vom Licht. In: DER HESS. KULTUSMINISTER (Hrsg.): *Kurse für die gymnasiale Oberstufe – Arbeitshilfen für die Hand des Lehrers im Fach Physik*. Frankfurt, 1981
- [Sch84] SCHÖN, L.: Bilder am großen Spiegel – Beispiele für eine Berücksichtigung affektiver Komponenten im Physikunterricht. In: *NiU-Physik* 32 (1984), S. 429–433
- [Sch93a] SCHNEIDER, T.: *Die Mondillusion*, Universität Kassel, Wissenschaftl. Hausarbeit (Examensarbeit), 1993
- [Sch93b] SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992* Bd. 13. Alsbach : Leuchtturm, 1993, S. 271–273
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Wag70] WAGENSTEIN, M.: *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken Bd. II*. Stuttgart : Klett, 1970
- [Wat81] WATZLAWIK, P.: *Die erfundene Wirklichkeit*. Zürich : Piper, 1981

Veröffentlichung 2

Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik

Lutz Schön

(aus: *Physik in der Schule* 32 (1994) 1. S. 2-5)

Vorbemerkung

Der programmatische Untertitel dieses Beitrages bezeichnet eine fachdidaktische Konzeption, die wir am Beispiel der Optik – "Vom Sehen zur Optik" – bereits seit einigen Jahren zu konkretisieren versuchen. Dabei geht es uns darum, mit den Schülern die sinnlichen Wahrnehmungen der Wirklichkeit zu untersuchen und begrifflich auszuarbeiten und so schrittweise das Gedankengebäude der Physik zu errichten. Um diesen Weg zu verdeutlichen, soll am Beginn ein Beispiel aus der Optik stehen. Im Anschluss daran werden zwei Argumente näher ausgeführt, die die geschilderte Vorgehensweise begründen.

2.1 Beobachtungen am Spiegel

Fragt man Laien nach der Physik des Spiegels, so wird die Antwort recht häufig lauten: "Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel". Denn dieses Gesetz gehört zu den wenigen physikalischen Gesetzen die aus der Schulzeit erinnert werden. Fragt man jedoch weiter, etwa "wie weit ist Dein Spiegelbild von Dir entfernt?", so werden die meisten Laien unsicher und häufig wird es wie eine Fotografie in die Spiegelfläche verlegt. Das physikalisch richtig erinnerte Gesetz hilft hier also nicht bei der Antwort auf die Frage nach einer alltäglichen Situation.

Ohne auf die übliche Behandlung des Themas Reflexion im Physikunterricht einzugehen, möchte ich hier einen Unterrichtsvorschlag zum Thema Spiegel am Beginn der Mittelstufe skizzieren, der von Alltagserfahrungen ausgeht, diese genauer und gründlich beobachtet und daraus Schlüsse und Gesetzmäßigkeiten ableitet. Das Ziel ist eine Formulierung von solchen Gesetzen, die physikalisch richtig und zugleich für lebensweltliche Fragen unmittelbar hilfreich sind.

2.1.1 Die Wirklichkeit der Spiegelwelt

Stellt man vor einen großen, vertikal aufgebauten Spiegel einen Gegenstand, so ist dieser auch im Spiegel zu sehen. Er ist dem vor dem Spiegel befindlichen sehr ähnlich, aber doch nicht identisch mit ihm, denn im Spiegel ist seine von uns abgewandte Seite zu sehen. Wird der Gegenstand bewegt und gedreht, so bewegt sich der Spiegelgegenstand entsprechend mit. Auch ein zweiter Gegenstand erscheint im Spiegel und hat dort die gleiche Position bezüglich des ersten gespiegelten Körpers wie die Gegenstände vor dem Spiegel.

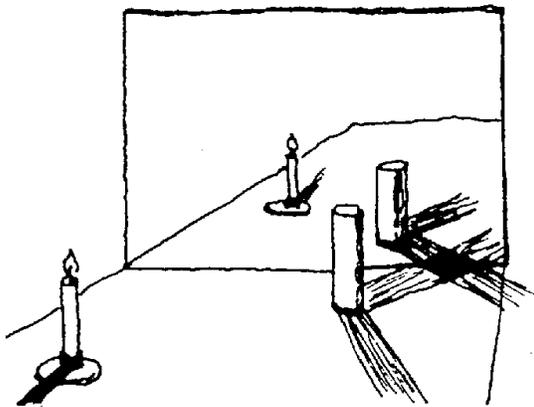


Abbildung 2.1: Kerze und Spiegelkerze erzeugen an der Säule verschiedene Schatten

Ist der zweite Gegenstand eine Kerze (Kerze entzünden, Raum verdunkeln), so wirft der Gegenstand einen gut sichtbaren Schatten und ebenso der gespiegelte: Auch die gespiegelte Kerze vermag also am gespiegelten Gegenstand einen Schatten zu erzeugen. Überraschend ist, dass bei geeigneter Position von Kerze und Gegenstand dieser Schatten aus der "Spiegelwelt" in die wirkliche Welt vor dem Spiegel fällt. Und die gespiegelte Kerze erzeugt am wirklichen Gegenstand einen Schatten. Bei genauerer Beobachtung entdeckt man viele Schatten (Abbildung 2.1), die einzeln analysiert werden müssen.

Wenn man sich mit diesen Beobachtungen hinreichend Zeit lässt, so sollte der folgende Merksatz von den Schülern formuliert werden können:

Die Spiegelwelt des ebenen Spiegels ist genauso räumlich wie unsere normale Welt.

Trotzdem unterscheidet sich die Spiegelwelt von der normalen: Wer dort Gegenstände greifen möchte, stößt sich an der Spiegelfläche. Der Merksatz muss deshalb ergänzt werden:

Die Spiegelwelt ist nur eine "Sehwelt" und keine "Tastwelt".

2.1.2 Messen in der Spiegelwelt

Die Aussage des ersten Merksatzes ist nur qualitativ, sie muss durch Messungen überprüft werden. Abstände werden mit Lineal oder Zollstock gemessen. Also messen wir zunächst erst einmal den Abstand Gegenstand/Kerze. In Abbildung 2.2 sind es 30 cm. Die Schüler werden entdecken, dass auch in der Spiegelwelt ein Maßstab liegt, der den Abstand zwischen gespiegelter Kerze und gespiegeltem Gegenstand mit 30 cm anzeigt. Kann man den Spiegelmaßstab wirklich benutzen, kann man ihm "trauen"? Verändert er sich nicht vielleicht? Wenn der erste Merksatz richtig ist, dann müsste der Maßstab gleich bleiben. Man lege einen zweiten, gleichen Maßstab hinter den Spiegel genau dorthin, wo der gespiegelte zu liegen scheint: Das hinter dem Spiegel hervorschauende Ende passt genau zu dem gespiegelten Maßstab, und zwar von jeder Beobachterposition aus! Der gespiegelte Maßstab ist also zulässig¹.

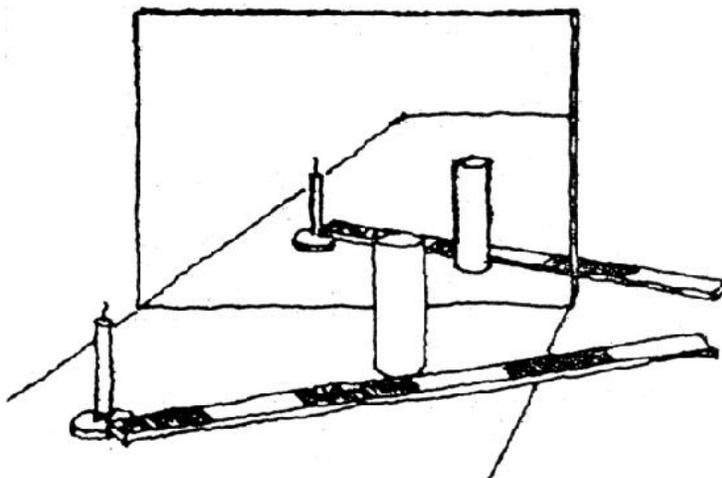


Abbildung 2.2: Der gespiegelte Maßstab geht am rechten Spiegelrand ohne jede Störung in den hinter dem Spiegel liegenden Maßstab über.

Jetzt ist auch eine Messung des Abstandes zwischen Gegenstand und seinem Spiegelbild möglich. Das Ergebnis liefert uns das 1. Spiegelgesetz:

Das Spiegelbild erscheint soweit hinter dem Spiegel, wie der wirkliche Gegenstand vor dem Spiegel ist. Sie stehen einander senkrecht gegenüber.

Mit diesem Gesetz lassen sich viele Alltagssituationen am Spiegel erklären und verstehen, etwa die Frage nach der Größe des Garderobenspiegels. Im Unterricht sollten ähnliche Phänomene untersucht werden, vielleicht auch solche, bei denen sich ein Spiegel im Spiegel spiegelt, z.B. beim Spiegelschränkchen im Badezimmer.

Will man den Abstand zwischen Gegenstand und Spiegelkerze direkt messen, so muss der Maßstab am Spiegel einen Knick machen. Dieser Knick muss genau so sein, dass der Maßstab

¹Wenn man ähnliche Versuche mit gewölbten Spiegeln zeigt (z.B. mit einem Rasierspiegel), wird deutlich, dass dort die gespiegelten Maßstäbe sich so verändern, dass mit ihnen ein Messen in der Spiegelwelt nicht erlaubt ist. Deshalb heißt es im 1. Spiegelgesetz auch "ebener" Spiegel.

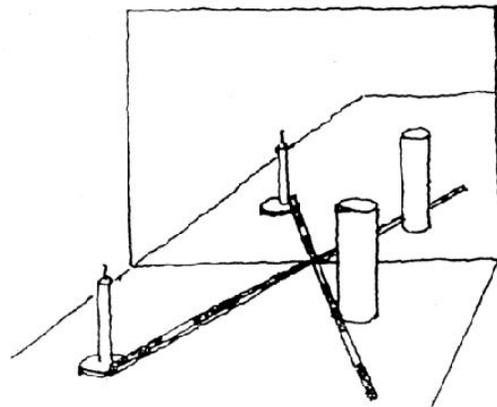


Abbildung 2.3: Die Abstände Kerze-Spiegelsäule und Säule-Spiegelkerze können gemessen werden, wenn der Zollstock zwischen diesen gerade verläuft, also am Spiegel richtig geknickt ist.

von der wirklichen Welt in die Spiegelwelt hinein gerade verläuft. Dies tut er dann zugleich für beide Abstände (Abbildung 2.3), also für AB' und BA' . Sofern in der Altersstufe bereits Winkel behandelt wurden, kann daraus das klassische Reflexionsgesetz abgeleitet werden, das wir hier als 2. Spiegelgesetz formulieren wollen:

Das Lot auf die Spiegelfläche halbiert den Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Lichtbündel. (Abbildung 2.4).

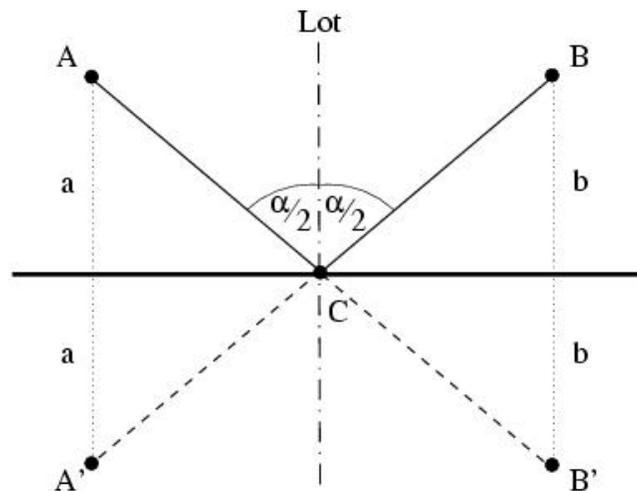


Abbildung 2.4: Die Ähnlichkeit der vier Dreiecke können die Schüler auch ohne Geometriekenntnisse intuitiv erfassen.

Hier ist vom Lichtbündel die Rede, obwohl wir bisher nur vom Sehen gesprochen haben. Folgende Beobachtung, die bereits vor der Formulierung des 2. Spiegelgesetzes gemacht werden sollte, stellt diesen Zusammenhang her: Wenn sich Anton und Berta über den Spiegel "in die Augen" schauen wollen, dann ist hierfür nur die Stelle C auf dem Spiegel nötig. Wenn nun Anton B'erta mit einer Taschenlampe blenden will, dann ist wiederum die gleiche Stelle C auf

dem Spiegel nötig, sofern er über die Taschenlampe hinweg B' erta anpeilt; "in Wirklichkeit" blendet er so Berta. Natürlich geht es auch umgekehrt. So sind Blickrichtung und Verlauf des Lichtbündels unmittelbar miteinander verknüpft.

2.1.3 Vertauscht der Spiegel links und rechts?

Das alltägliche Phänomen, "der Spiegel vertauscht links und rechts", führt uns zu einem weiteren Spiegelgesetz. Wer vor dem Spiegel stehend nach rechts (z.B. zur Tür) weist, der sieht sein Spiegel-Ich auch nach rechts, also zur Tür weisen. Das gleiche gilt für links, für oben und für unten. Wer aber von sich weg in Richtung Spiegel weist, dessen Spiegel-Ich zeigt auf ihn, also in die entgegengesetzte Richtung! Alle Richtungen bleiben in der Spiegelwelt erhalten, nur die eine wird umgekehrt, die senkrecht zur Spiegelfläche. Steht ein rotierender Kreisel vor dem Spiegel, dann rotiert der Spiegel-Kreisel in die entgegengesetzte Richtung; die beiden Kreisel drehen sich wie zwei Zahnräder, die ineinandergreifen. Das ist nun leicht zu verstehen, wenn man die Drehung durch Pfeile markiert (Abbildung 2.5). Dementsprechend kann nun das 3. Spiegelgesetz formuliert werden:

Der Spiegel vertauscht den Drehsinn, weil er die Richtung senkrecht zu seiner Fläche umkehrt.

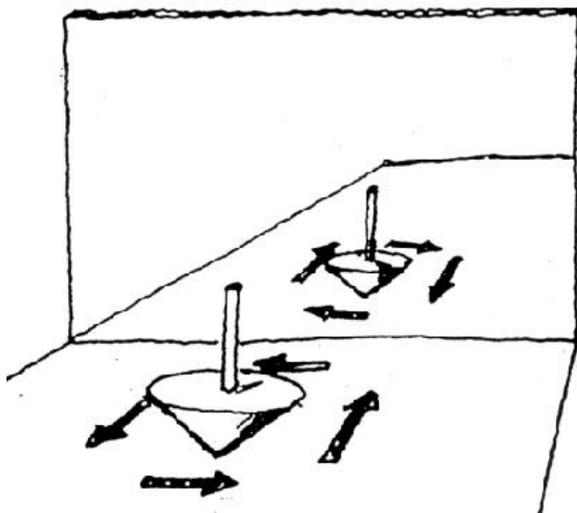


Abbildung 2.5: Der Kreisel dreht sich gegen den Uhrzeigersinn, der Spiegelkreisel mit dem Uhrzeigersinn. Nur die Pfeile senkrecht zur Spiegelfläche ändern in der Spiegelwelt ihre Richtung.

Es ist nicht ganz leicht, mit diesem Gesetz unsere alltägliche Beobachtung, mein Spiegel-Ich streckt mir die linke Hand entgegen, wenn ich ihm die rechte reiche, zu erklären: Rechts sind die Dinge, die im Uhrzeigersinn gedreht neben unserer Geradeaus-Richtung liegen, links entsprechend gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Wenn dies auch für mein Spiegel-Ich gilt, dann reicht es mir seine rechte Hand. Weil ich aber die Umkehrung des Drehsinnes meines Spiegel-Ichs nicht berücksichtigt, also seine Hand mit meiner Definition beurteile, halte ich das Spiegel-

Ich für linkshändig. (Wenn man die Kinderdefinition, rechts ist dort, wo die Armbanduhr nicht ist, benutzt, reicht mir das Spiegel-Ich seine rechte Hand!)

2.1.4 Was haben wir anders gemacht?

Es ist hoffentlich deutlich geworden, dass bei dieser Vorgehensweise zur Erarbeitung der optischen Gesetze am Spiegel das Sehen im Vordergrund stand. Wir haben unser Auge nicht nur zur Beobachtung eines äußeren Sachverhaltes benutzt, sondern wir haben die wahrgenommenen Bilder genauer betrachtet. Unsere Wahrnehmung am Spiegel wurde zum Ausgangspunkt der Untersuchung. Allerdings sind wir nicht bei den schönen und überraschenden Eindrücken stehen geblieben, sondern haben nach einem messbaren Zusammenhang gesucht, der später dann auch Voraussagen zulässt. Die erarbeiteten Gesetze wurden wieder auf Alltagssituationen angewendet, also die Physik als Erkenntnishilfe im Alltag genutzt.

2.2 Warum dieser enge Bezug zur Alltagswelt?

Es gibt eine ganze Reihe von Argumenten, die für eine enge Bindung des Physikunterrichts an die Lebenswelt sprechen. Vor allem die Schüler selbst erwarten von der Physik eine enge Verzahnung mit der Lebenswelt [KBR87]. Dies belegen auch die Befragungen zur Einstellung der Schüler zum Physikunterricht (eine Übersicht findet man in [LHG85]). An dieser Stelle sollen zwei Argumente für den engen Bezug zur Alltagswelt thesenartig belichtet werden, von denen das erste einen lernpsychologischen, das zweite einen pädagogischen Aspekt betrifft.

These 1: Damit die Physik zum aktiven Gedankengut werden kann, müssen die Schüler die physikalischen Aussagen für wahr im Sinne der Alltagserfahrungen halten können.

Unser Wissen von der unbelebten Welt stützt sich auf unsere Sinneswahrnehmungen. Sicherlich treten zu den Sinnen noch weitere Erfahrungsbereiche hinzu, die Sinnesorgane jedoch vermitteln zwischen dem Individuum und der Welt. Allerdings, "die Erfahrung allein, ohne die sie begleitenden Gedanken, würde uns stets fremd sein", sagt Mach [Mac33, S. 465]. Die Flut der auf uns einströmenden Sinnesindrücke muss geordnet werden. Das Denken ergänzt diese Eindrücke, erweitert und verändert sie und verknüpft sie mit anderen, vor allem auch mit erinnerten Wahrnehmungen. Sinnliches Erleben und Denken sind in einem ständigen Wechselspiel ineinander verwoben, wobei das eine nicht ohne das andere auskommen kann.

Schließlich bewertet unser Denken diese Eindrücke. Dabei halten wir die im Denken hergestellten Zusammenhänge dann für wahr, wenn mit ihnen viele Eindrücke sinnvoll ergänzt werden können. Wahr nennen wir somit solche Gedanken, die auf einem breiten und sicheren Fundament im Bereich der Sinneswahrnehmungen ruhen. Dies gilt in besonderem Maße für

die Naturwissenschaften. "Diejenigen Gedanken, welche auf dem größten Gebiet festgehalten werden können und am ausgiebigsten die Erfahrung ergänzen, sind die wissenschaftlichsten." [Mac33]

Können unsere Schülerinnen und Schüler die Sachverhalte, die sie im Physikunterricht lernen sollen, für wahr im geschilderten Sinne halten? Zwar stützt sich der Physikunterricht auf Wahrnehmungen, aber nur auf Wahrnehmungen im Physikraum! Zeigerausschläge der verschiedensten Instrumente sind dort die Sinneseindrücke, auf denen das Gedankengebäude der Physik errichtet werden soll. Diese Welt ist nur ein sehr, sehr kleiner Ausschnitt der Wirklichkeit des Schülers. Falls aber die lernpsychologische Hypothese richtig ist, dass erst dann neue Erkenntnisse verstanden und längerfristig behalten werden, wenn sie in der genannten Weise für wahr gehalten werden können, dann ist das Fundament der Sinneseindrücke aus dem Physikunterricht zu schmal. Es müssten weitere Erfahrungen der Schüler aktiviert werden, damit deren Gedanken "in Bewegung" kommen, neu verknüpft und somit zu "wissenschaftlichen Gedanken" werden können.

These 2: Im Physikunterricht sollen die Schüler den Zusammenhang zwischen Gedankenwelt und Wirklichkeit unmittelbar erleben.

Ein zweiter, eher allgemeinpädagogischer Aspekt bestärkt uns, die Alltagswelt der Schüler zum Ausgangspunkt des Physikunterrichts zu machen: Angesichts der von Bildmedien geprägten Wahrnehmungen unserer Schüler, halten wir es für besonders bedeutsam, die Schüler erleben zu lassen, dass im Bereich der Physik der hier entfalteten Gedankenwelt Wirklichkeit entspricht. Denn im Gegensatz zu den Medien, die den Schüler permanent mit kaum durchschaubaren Bildwelten konfrontieren (der im Krimi ermordete Graf ist natürlich nicht wirklich tot, und dies wissen selbstverständlich auch die Schüler; die Bilder der Tagesschau aus Jugoslawien sind dagegen aber schreckliche Wirklichkeit!), kann im Physikunterricht der Weg von der sinnlichen Wahrnehmung hin zum Denken und zum physikalischen Begriff durchschritten werden und dann wieder zurück zur erlebten Wirklichkeit führen. Die in Gesetzen und Formeln gefasste Gedankenwelt der Physik kann und muss sich an der Wirklichkeit messen lassen: Aus der Gedankenwelt der Physik werden also Handlungen abgeleitet. Denken und Handeln sind hier noch nahe beieinander.

Ganz anders sieht es in der Video- und Fernsehwelt der Jugendlichen aus: Die durch sie vermittelte Gedankenwelt erlaubt nur selten sinnvolle Handlungen. Selbst die "wahren" Informationen über die schrecklichen Geschehnisse in der Welt können gar nicht in eine adäquate Handlung münden, dazu sind die Ereignisse zu gern und zugleich sind es derer so erdrückend viele.

Noch verheerender können hier die Videos wirken. Die Bilder ihrer Scheinwelten übertreffen oft die erschütternden Bilder der Tagesschau an Grausamkeit. Wie gehen Kinder mit diesen

Eindrücken, die zu einer ganz eigenen Gedankenwelt wird, um? Welches sind die Handlungen, die diesen Gedanken entspringen?

Nur wenn sich Denken auf Wirklichkeit bezieht, kann sinnvoll gehandelt werden. Vielleicht kann der Physikunterricht – wenn auch eher indirekt – einen Beitrag zu dieser ganz aktuellen pädagogischen Aufgabe leisten, indem er an Beispielen den notwendigen Zusammenhang von Denken und Handeln erleben lässt.

2.3 Schluss

Für den Bereich der Optik stellt das Sehen das sinnliche Fundament dar. Hier ist es relativ leicht, visuelle Phänomene erleben zu lassen und darüber ins Gespräch zu kommen [Mai86, Sch84].

Sehr viel schwieriger ist es, sich die entsprechenden Sinneswahrnehmungen für den Bereich der Mechanik bewusst zu machen. Denn unser Bewegungssinn beispielsweise ist uns kaum noch zugänglich: Unbemerkt unterdrücken wir bei einer Eigenbewegung die visuell wahrgenommene Bewegung der Umgebung. Dem Bewusstsein etwas leichter zugänglich ist das Krafterleben. Es ist meist mit einer Berührung verbunden, also auch über den Tastsinn erfahrbar. Wenn wir Kräfte auf einen Gegenstand ausüben oder wenn dieser auf uns lastet, so ist dies deutlich spürbar und kann anderen Menschen mitgeteilt werden. Solche Erfahrungen können deshalb mit dem Denken bearbeitet und damit zu einem sinnlichen Fundament der Statik und Dynamik werden [Sch92]. Der didaktische Ansatz "Von der Wahrnehmung zur Physik" ist also nicht nur auf die Optik beschränkt, sondern kann auch in anderen Bereichen der Physik für die Curriculumentwicklung handlungsleitend sein.

Literaturverzeichnis

- [KBR87] KUBLI, F. ; BOSSI, J. ; RISCH, M. *Interesse und Verstehen in Physik und Chemie*. 1987
- [LHG85] LEHRKE, M. ; HOFFMANN, L. ; GARDNER, P.L. *Interest in Science an Technology Education, 12th IPN Symposium 1985*. 1985
- [Mac33] MACH, E. *Die Mechanik historisch-kritisch dargestellt*. 1983 (1933)
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [Sch84] SCHÖN, L.: Bilder am großen Spiegel – Beispiele für eine Berücksichtigung affektiver Komponenten im Physikunterricht. In: *NiU-Physik* 32 (1984), S. 429–433
- [Sch92] SCHÖN, L.: Die sinnliche Erfahrung als Grundlage für das Verstehen von Physik – Beispiele aus der Mechanik. In: WIEBEL, K.H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge aus der GDGP-Tagung in Hamburg 1991*. Alsbach, 1992, S. 259–261

Veröffentlichung 3

Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz – Vorschläge zum Anfangsunterricht über Optik

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: *NiU Physik* 11 (60), S. 30-36)

Vorbemerkung

Am Beispiel einer Unterrichtssequenz zur Reflexion am ebenen Spiegel wird dargestellt, wie Anfangsunterricht zur Optik gestaltet werden kann, der auf langfristigen und tragfähigen Wissenserwerb ausgerichtet ist. Mit dem "Prinzip Ameise" wird ein Vorgehen vermittelt, das von der unmittelbaren Beobachtung ausgeht, mit der "Spiegelwelt" und den "Lichtwegen" ein Modellverständnis, das bis in die Quantenphysik hinein gültig bleibt. Es folgt ein Ausblick auf den daran anknüpfenden Optikunterricht im Rahmen des "Lichtwegkonzepts".

3.1 Der Anfang und das Ganze

"Der Anfang ist die Hälfte des Ganzen", wußte schon Aristoteles, und unzählige Male hat sich dieser Satz auch für den Physikunterricht als zutreffend erwiesen. In der Tat zeigen wissenschaftliche Untersuchungen wie die von Lichtfeldt [Lic96], dass gerade anfangs aufgenommene Vorstellungen – insbesondere wenn sie sich mit den Präkonzepten vereinbaren lassen – den späteren Wissenserwerb in überproportional hohem Maße beeinflussen. Wiesner [Wie94] hat sich mit den Präkonzepten zur Optik auseinandergesetzt und einen Unterrichtsgang entwickelt,

der sich an den Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert, aber vom Ansatz her auf die geometrische Optik begrenzt ist.

Wir möchten weitergehende Konsequenzen ziehen: Wenn wir Anfangsunterricht planen, so müssen wir bereits von den ersten Stunden an das berücksichtigen, was den Schülern später im Unterricht begegnet. Nacheinander folgende Lerninhalte sollten aufeinander aufbauen, und keinesfalls darf der Anfangsunterricht Vorstellungen begünstigen, die dem Verständnis später zu lernender Inhalte hinderlich sein könnten.

Wie weit der Physikunterricht davon entfernt ist, diese Anforderung zu erfüllen, zeigt sich deutlich im Unterricht zur Optik, wie er durch die meisten Lehrpläne und Schulbücher nahegelegt wird. Dort wird bereits nach wenigen Unterrichtsstunden mit dem Lichtstrahlmodell eine Betrachtungsweise eingeführt, die in der Interferenz- und Quantenoptik im Oberstufenunterricht kaum wieder aufgegriffen wird. Vielmehr besteht bei der frühzeitigen Einführung dieses Modells die Gefahr einer Verwechslung mit der Realität. Wenn Schüler aber glauben, das Licht bestehe wirklich aus Strahlen, so ist das in der Tat ein nicht zu unterschätzendes Hindernis für die spätere Deutung von Interferenzphänomenen.

Auch über kürzere Unterrichtszeiträume hinweg scheint die Kohärenz des Unterrichts gering zu sein. So ist das Thema "Schatten" meist Gegenstand der ersten Optik-Stunden, um dann bei der Behandlung der Brechung und der Reflexion links liegengelassen zu werden. Könnte man nicht, statt bei der Reflexion und der Brechung das problematische Lichtstrahlmodell einzuführen, einfach mit den Schatten weiterarbeiten? Eine bessere inhaltliche Abstimmung von Unterrichtsinhalten sollte es auch ermöglichen, größere Spannungsbögen im Unterricht zu schaffen, die für die Schüler die Zusammenhänge zwischen zeitlich auseinanderliegenden Stunden spürbar und transparent machen.

Am Beispiel einer kurzen Unterrichtssequenz von vier Stunden zur Einführung der Reflexion in einer siebten Klasse möchten wir aufzeigen, wie Anfangsunterricht durchgeführt werden kann, der auf langfristigen Wissensaufbau hin orientiert ist.¹ Die dazwischenliegenden normal gedruckten Abschnitte sollen anhand dieser Beispiele einige didaktische Aspekte unseres Unterrichtsganges näher erläutern. Der Unterricht wurde in einem Berliner Gymnasium im Rahmen des SINUS-Programms (Modul 5: kumulatives Lernen) durchgeführt [Bun96, S. 93]. Anhand dieses Beispiels erläutern wir auch einige didaktische Aspekte unseres Unterrichtsganges. Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite zeigt einen Überblick über den gesamten Unterrichtsgang. Am Ende des Artikels soll angedeutet werden, welche Anknüpfungspunkte wir uns für den Optikunterricht nach dem Lichtwegkonzept in den höheren Klassen vorstellen.

¹Um dem Leser ein anschauliches Bild zu geben, schildern wir einzelne Unterrichtsabschnitte aus der Sicht eines Beobachters möglichst detailliert, aber ohne den Anspruch, dass der Unterricht genau so abzulaufen habe. Diese unterrichtsnahen Abschnitte des Beitrags sind im folgenden serifenlos gesetzt.

Die Form des Mondes	1. Std.	Licht und Dunkelheit. Erfahrung des Sehens.
	2. Std.	Auswertung der Beobachtungen zu "Licht und Dunkelheit", HA: Mondbetrachtungen.
	3. Std.	Zeichnen der einseitig beleuchteten Kugel von verschiedenen Standpunkten. Schülerübung
	4. Std.	Der Lauf des Mondes. Regeln und Vorhersagen
	5. Std.	Der Mond fährt mit. Die Blickrichtung zu bewegten Objekten
weiße Schatten	6. Std.	Der Schattenwürfel. Beobachtung verschiedener Schattenphänomene
	7. Std.	Das Prinzip Ameise. Eine Möglichkeit, Kernschatten und Übergangsschatten zu beschreiben
	8. Std.	Das Prinzip Ameise II. Erklärung des weißen Schattens
	9. Std.	Schatten verschiedener Lichtquellen. Die Abhängigkeit von der Form der Lichtquelle
	10. Std.	Die Lochkamera. Anwendung des "Prinzips Ameise"
Doppelschatten- experiment	11. Std.	Hat der Spiegel eine Farbe? Die Entdeckung des Spiegels
	12. Std.	Die Spiegelwelt. Doppelschattenexperiment
	13. Std.	Schatten in der Spiegelwelt. Der Zylinder vor dem Spiegel
	14. Std.	Das Spiegelgesetz. Schülerübungen
	15. Std.	Das Spiegelgesetz. Schülerübungen
	16. Std.	Die Auflösung des Doppelschattenexperiments
Lichtwege bei der optischen Hebung	17. Std.	Der gerade und der geknickte Stab. Die optische Hebung
	18. Std.	Messung der optischen Hebung
	19. Std.	Die Totalreflexion
	20. Std.	Der Blick durch die Schusterkugel. Die Wirkung einer Kugellinse

Abbildung 3.1: Stundenübersicht zu unserer Anfangsoptik. Die Kästen links deuten übergeordnete Problemstellungen an, die grau unterlegten Stunden werden in diesem Artikel beschrieben.

3.2 Die Entdeckung des Spiegels

Zu Unterrichtsbeginn ist es dunkel im Physikraum. Nur schemenhaft hebt sich vorn das mit schwarzen Tüchern² zugehangene Pult ab. Kaum deutlicher ist darauf ein helles Rechteck zu erkennen. Nun schaltet der Lehrer die an der Decke angebrachte Experimentierleuchte ein. Schräg von oben fällt ein Lichtkegel auf das Rechteck. "Auf der hellen Fläche befindet sich ein Deckel", erklärt der Lehrer und schiebt eine kreisrunde Abdeckung (③ in Abbildung 3.2) etwas beiseite. Die schmale Sichel einer ebenfalls kreisförmigen Öffnung wird unter dem Deckel sichtbar. Tiefschwarz erscheint sie inmitten der hellen Fläche aus weißer Pappe.

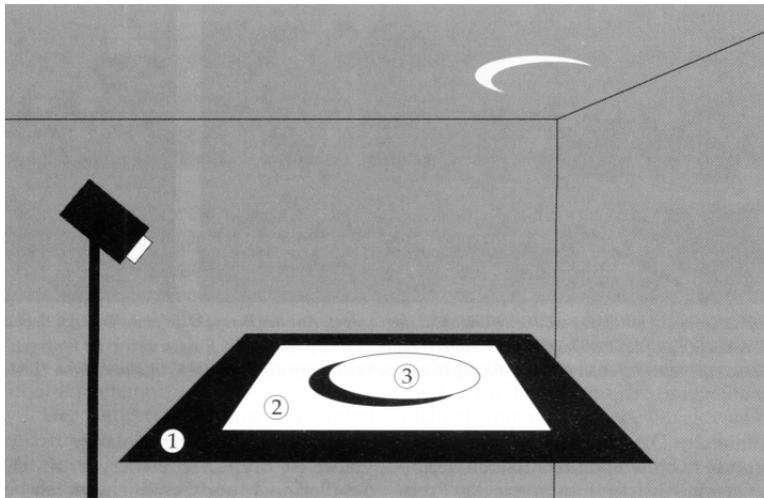


Abbildung 3.2: Anordnung zur "Entdeckung des Spiegels". Auf schwarzem Tuch ① liegt ein großer Spiegel unter einem weißen Zeichenkarton ②, in den ein kreisrundes Loch geschnitten ist. Das Loch wird von einer etwas größeren weißen Kreisscheibe ③ verdeckt, deren Rand von unten geschwärzt ist.

Schnell wird die erste Vermutung, durch die Öffnung sei das darunterliegende schwarze Tuch zu sehen, verworfen, denn das Schwarz der Öffnung erscheint viel dunkler als das der herumliegenden Tücher, die nun fast grau aussehen. Die Klasse spaltet sich in zwei Parteien: Einige suchen nach immer neuen Materialien, die gleichzeitig schwarz sind und eine glatte Oberfläche haben - eine schwarze Steinplatte oder eine Glasplatte, die sich auf einer schwarzen Unterlage befindet. Andere hingegen sind radikaler: Sie vermuten, der Lehrer hätte zuvor ein Loch in den Tisch gesägt, in das man nun hineinsehen könne.

Schließlich bemerkt einer den Lichtfleck an der Decke, gegenüber der Lampe. "Der hat ja die gleiche Form wie die Öffnung!" Sofort ist klar, dass sich in der Öffnung ein Spiegel befindet, doch es bleibt Verwunderung darüber, warum der Spiegel dort so schwarz aussieht. Oder war es vielleicht doch ein Loch, in dem sich eine weitere Lampe befindet? Könnte nicht der Lichtfleck an der Decke auch durch eine Lampe in dem Loch erzeugt werden?³

²Die Beschaffung einiger großer Tücher im Stoffhandel ist nicht ganz preiswert, lohnt sich aber für viele Gelegenheiten im Physikunterricht, bei denen störende Lichtreflexe vermieden oder Räume besonders gut abgedunkelt werden sollen. Häufig kann schwarzer Vorhangstoff z. B. von einer Theatergruppe geliehen werden.

³Einen ähnlichen Zugang, bei dem die hinter dem Spiegel erscheinende Lichtquelle betrachtet wird, wählt

Diesen Raum hinter dem Spiegel, der hier den Eindruck eines Loches erweckt und in dem alle Gegenstände zu sehen sind, die sich vor dem Spiegel befinden, bezeichnen wir von nun an als "Spiegelwelt". Der Spiegel selbst ist, da er farblos ist und da man die Spiegelwelt durch ihn hindurch sieht, in dieser Vorstellung ein Fenster zur Spiegelwelt. Keinesfalls befinden sich die Spiegelbilder "auf dem Spiegel". Bald haben sich die Schüler an diese Betrachtungsweise gewöhnt, und ihnen fällt auf, wie oft man im Alltag einer Spiegewelt begegnet: Im Supermarkt, wo durch die Spiegelwelt das Obst- und Gemüseangebot vergrößert wird, im Schlafzimmer, wo der verspiegelte Schrank den Raum auf das Doppelte anwachsen lässt usw.

Wenn ein Unterrichtsabschnitt zur Reflexion bzw. zum Spiegel von einem Phänomen ausgehend begonnen werden soll, können leicht Schwierigkeiten dadurch entstehen, dass die Schüler nicht einsehen, warum sie sich mit dem Phänomen gründlich auseinandersetzen sollen. Jedes Kind hat schließlich schon unzählige Male einen Spiegel gesehen und glaubt genau zu wissen, wo sich die Spiegelbilder befinden, welche Eigenschaften sie haben usw. Zu trivial erscheint das Untersuchungsobjekt, um sich auf eine ernsthafte Beobachtung einzulassen, viel zu klar die eigene (Fehl-)vorstellung, um sie wirklich in Frage zu stellen.

Wir möchten die Schüler, indem wir den Spiegel verfremden, zunächst verunsichern, dann aber zu genauen Beobachtungen provozieren [Sch83]. Der Anreiz zur Beobachtung gelingt um so besser, je rätselhafter das Objekt ist und um so mehr es daran zu entdecken gibt. Und je besser die Beobachtung gelingt, desto eher sind die Schüler bereit, vorhandene Fehlvorstellungen aufzugeben.

3.3 Das Doppelschattenexperiment

Die Stunde ist noch nicht zuende. "Nun", sagt der Lehrer, "werde ich meine Hand über den Spiegel halten." Sofort ist den Schülern klar, was passieren wird: Der Spiegel reflektiert das Lichtbündel der Lampe an die Decke, die Hand wirft einen Schatten in diesem Lichtbündel, also wird ein Schatten der Hand an der Decke zu sehen sein. – Dieser Gedankengang etwa lässt sich aus den Antworten der Schüler rekonstruieren. Der Lehrer tut das offenbar Überflüssige: Langsam schiebt er, etwa 10 cm über dem Spiegel, seine Hand über die Spiegelfläche, langsam erscheint vom Rand her kommend ein Schatten der Hand an der Decke. Unbeirrt bewegt der Lehrer seine Hand weiter, bis etwas Überraschendes passiert. Während der vor-

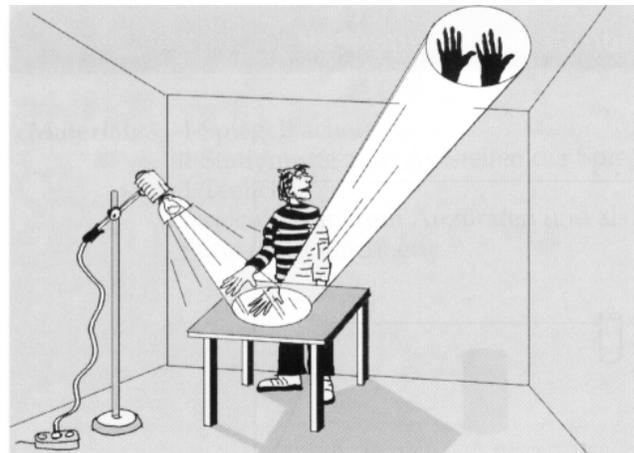


Abbildung 3.3: Prinzipskizze zur Durchführung des Experimenten "Doppelschatten".

sich zur Mitte des Lichtflecks hin bewegt, erscheint vom Rand her ein zweiter handförmiger Schatten, obwohl der Lehrer nach wie vor nur die eine Hand über den Spiegel hält (Abbildung 3.3 auf der vorherigen Seite). Weitere merkwürdige Dinge sind zu beobachten: Der zweite Schatten sieht etwas anders aus als der erste. Er bewegt sich auch, aber nur dann, wenn sich der erste Schatten bewegt, d.h. wenn der Lehrer seine Hand über dem Spiegel bewegt. Dreht der Lehrer seine Hand um die Längsachse, so scheinen sich beide Schattenprojektionen mitzudrehen, allerdings in entgegengesetzter Richtung. Eine Steigerung des Erstaunens ergibt sich, als der Lehrer zusätzlich seine zweite Hand über den Spiegel schiebt... Die Schüler sind ratlos. Jemand vermutet, es sei ein doppelter Spiegel vorhanden, kann sich aber davon überzeugen, dass es sich um einen ganz gewöhnlichen Spiegel handelt. Jetzt klingelt es zum Stundenende.

Dass die Stunde, kurz nachdem das Problem aufgeworfen ist, zuende geht, mag als Versehen oder als Planungsfehler erscheinen. Nach dem üblicherweise in der Didaktik gelehrt und vielfach praktizierten Ablauf einer problemorientierten Unterrichtsstunde müssten die Schüler jetzt noch weitere Vermutungen zu den doppelten Schatten nennen, eine Lösung erarbeiten und schließlich ein Ergebnis formulieren. Davon sind wir in dieser Stunde noch weit entfernt, doch dahinter steckt Absicht: Indem wir das Problem erst kurz vor Stundenende aufwerfen, möchten wir den Schülern Gelegenheit geben, sich bis zur nächsten Stunde ohne Zeitdruck und ohne die führende Hand des Lehrers Gedanken über das merkwürdige Phänomen zu machen, anderen darüber zu berichten und mit ihnen gemeinsam nachzudenken. Dahinter steckt die Annahme, dass ein eindrucksvolles Problem, solange es ungelöst ist und Zweifel hervorruft, die Schüler wirklich bewegt – bereits Wagenschein hat diesen Zustand beschrieben und ihn als "produktive Verwirrung" bezeichnet [Wag92]. Wenn wir solche Denkprozesse zwischen den einzelnen Physikstunden anstoßen, dann stellen wir eine bessere Verbindung zwischen ihnen her als es andernfalls möglich wäre. Für die Schüler sind spürbare Verbindungen zwischen den Stunden unseres Erachtens eine wichtige Grundlage für den kumulativen Aufbau von Wissen.

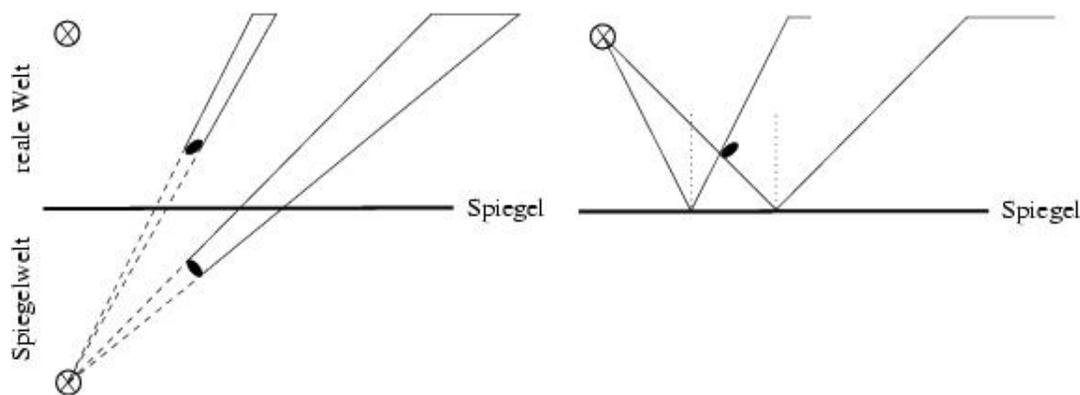
In diesem Fall gehen wir mit unserer Unterrichtsplanung sogar noch einen Schritt weiter. Das im Raum stehende Problem ist so komplex, dass es sich auch nicht in der folgenden Stunde abschließend lösen lassen wird. Am Ende der nächsten Stunde werden die Schüler das Phänomen zwar mit Hilfe der Spiegelwelt besser beschreiben können, aber erst nach weiteren zwei Stunden werden sie eine Gesetzmäßigkeit kennen, die ihnen eine von Fehlvorstellungen bereinigte Erklärung ermöglicht (s.u.). Die Doppelschatten stellen also eine Leitlinie dar, anhand derer die Inhalte der folgenden Stunden erarbeitet werden sollen. Daraus ergibt sich ein größerer Spannungsbogen für den Unterricht, der mit der Problemstellung beginnt, mehrere Stunden umfasst und mit der Anwendung des schließlich erarbeiteten Gesetzes auf die Ausgangssituation des Doppelschattenexperimentes endet. Weniger komplexe Probleme ermöglichen zwar im allgemeinen schnellere Lösungen, aber keine langen Spannungsbögen. Gerade lange Spannungsbögen verbinden Inhalte mehrerer Stunden miteinander (vertikale Vernetzung) und fördern so den Wissensaufbau.

Inhaltlich wurde mit dem Doppelschattenexperiment die Reflexion am ebenen Spiegel eingeführt. Gleichzeitig haben wir damit aber auch ein weiteres Experiment zum vorangegangenen Thema "Schatten" durchgeführt (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 37). Es ist uns wichtig, das alte Wissen aufzugreifen, es zu erweitern und in neue Zusammenhänge zu stellen. So halten wir nicht nur das bisher erworbene Wissen länger frisch und gewinnen Anknüpfungspunkte für den nachfolgenden Wissenserwerb, sondern die Schüler erfahren auch, dass sich das bisherige Lernen gelohnt hat und ihnen nun nützlich sein kann.

3.4 Lösungsansatz mit dem Prinzip "Prinzip Ameise"

In der folgenden Stunde bleiben die von uns erhofften Lösungsvorschläge aus. Dennoch scheinen sich zumindest einige Schülerinnen und Schüler in der Zwischenzeit gedanklich damit beschäftigt zu haben. Bei der Beschreibung der Beobachtungen an dem wieder aufgebauten Experiment werden auch Details zu den Bewegungen der Schatten genannt.

Der Lehrer ist darauf vorbereitet und reagiert, indem er "Meisi" hochhält, eine kleine Ameisenattrappe, die an einem Zeigestock befestigt ist. Nach kurzem Überlegen haben gleich mehrere Schüler eine Idee, wie es weitergehen könnte.



(a) Ausgehend von Beobachtungen der "Ameise" und mit Hilfe der eingezeichneten Spiegelwelt erhält man eine Konstruktion aus gerade Verbindungslinien (Schattengrenzen).

(b) Bei der sonst üblichen Konstruktion kommt man ohne die Spiegelwelt aus, aber es müssen Hilfslinien (Lote) eingezeichnet und Winkel gemessen werden. Der Punkt S_1 kann auf dem Niveau des Anfangsunterrichts nur durch Probieren gefunden werden.

Abbildung 3.4: Konstruktion der Doppelschatten.

Die Ameisenattrappe "Meisi" steht in unserem Unterricht für das "Prinzip Ameise" [Hei95]: Eine Ameise, die an einer Wand (oder einer Zimmerdecke) entlang krabbelt, auf die – infolge

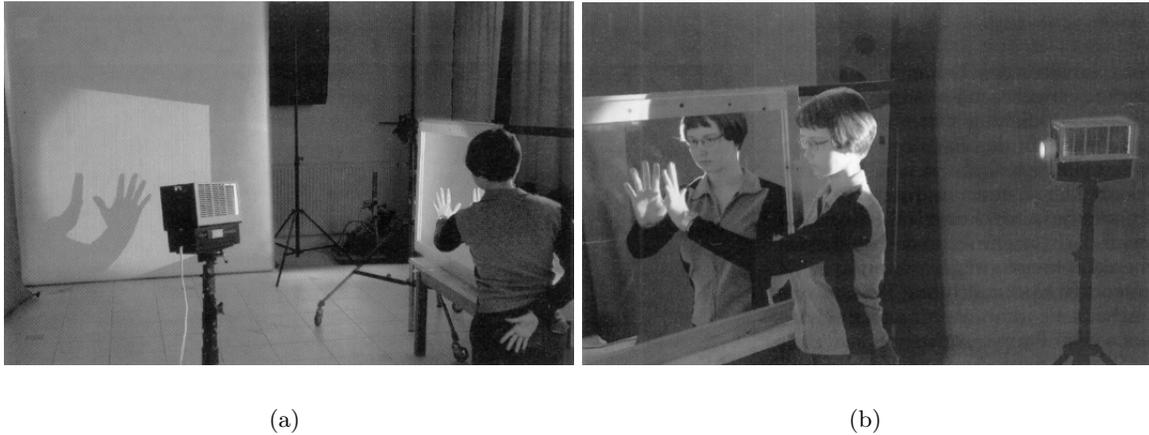


Abbildung 3.5: Doppelschattenexperiment, horizontal angeordnet. Aus der Perspektive des äußeren Beobachters sind die doppelten Schatten auf dem Schirm zu sehen (a); aus der Perspektive der Ameise ist hingegen zu erkennen, wodurch die Schatten erzeugt werden – hier befindet sich die Ameise in dem Schatten, den der Kopf der Spiegelperson im Licht der Spiegellampe wirft (b).

der Lichtquellen und Schattenkörper in der Umgebung – ein Muster aus Licht und Schatten fällt, könnte beschreiben, auf welche Weise der Schatten an ihrem Aufenthaltsort entsteht, da sie beobachten kann, welche Lichtquellen durch welche Schattenkörper verdeckt werden (Abbildungen 3.4 und 3.5). Da "Meisi" nicht sprechen kann, ist es in solchen Fällen Aufgabe der Schüler, sich an den Ort der Ameise zu begeben und ihre Beobachtungen zu nennen. Mit Hilfe des "Prinzips Ameise" lässt sich die Entstehung komplexer Schattenmuster beschreiben.

Aus dem Sammlungsraum wird eine Leiter geholt und so aufgestellt, dass einzelne Schüler Beobachtungen vom Ort der Schatten an der Decke durchführen können. Die Hand des Lehrers wird durch eine Hand aus Pappe ersetzt, um eine dauerhafte Beobachtung zu ermöglichen.

Tief unterhalb des Spiegels sieht der Schüler, während er von der Leiter nach unten blickt, die Spiegellampe. Bewegt er sein Auge in den einen der beiden Schatten, so bemerkt er, wie die Spiegellampe von der Hand in der Spiegelwelt verdeckt wird, bewegt er es in den anderen der beiden Schatten, so erkennt er, dass die Spiegellampe nun von der wirklichen Hand über dem Spiegel verdeckt wird.

Die Interpretation der Beobachtungen ist für die Schüler nicht unbedingt einfach. Oft wird die unter dem Spiegel sichtbare Lichtquelle nicht als Spiegellampe akzeptiert, die Hand und die Spiegelhand werden nicht als unterschiedliche Objekte gedeutet. Hier empfiehlt es sich Hilfen anzubieten (Abbildung 3.6 auf der nächsten Seite): So kann der Verlauf der von Lampe und Spiegellampe erzeugten Lichtkegel zunächst ohne die Schattenhände beschrieben werden. Die Unterscheidung von Hand und Spiegelhand gelingt leichter, wenn die Ober- und Unterseite der Papphand unterschiedlich gefärbt sind.

Arbeitsblatt:

Das Doppelschattenexperiment

Zimmerdecke



Spiegel

Aufgabe:

Trage die gespiegelte Hand und die gespiegelte Lichtquelle ein. Erkläre dann durch Einzeichnen, wie die beiden Schatten an der Decke entstehen!

Abbildung 3.6: Arbeitsblatt zum Doppelschattenexperiment

Mit dem Prinzip Ameise und der Spiegelwelt werden in dieser Stunde gleich zwei tragende Prinzipien unserer Anfangsoptik aufgegriffen. Beide Prinzipien werden in wechselnden Zusammenhängen immer wieder angewendet und bilden so einen Leitfaden des Unterrichts. Das im Zusammenhang mit dem Thema "Schatten" eingeführte "Prinzip Ameise" steht gleichzeitig für den phänomenologischen Zugang in unserer Anfangsoptik: Die Schüler betrachten Experimente nicht mehr nur von außen, sondern werden als Lichtempfänger einbezogen und somit Teil des Experiments. Das Prinzip Ameise trägt also zum Aufbau des Wissens bei, indem es durchgehend verwendet wird, und kommt den jüngeren Schülern entgegen, indem es die sinnliche Wahrnehmung in den Mittelpunkt rückt.

3.5 Licht und Schatten in der Spiegelwelt

In der folgenden Stunde wird der bisher horizontal liegende Spiegel aufgerichtet, damit wir gemeinsam Beobachtungen durchführen und darüber sprechen können. Vor dem Spiegel liegt ein großes Blatt weißes Papier, das im Spiegel weiterzugehen scheint. Die Hand aus dem Doppelschattenexperiment wird durch einen einfacheren Körper ersetzt, zum Beispiel eine zylindrische Vase, die vor dem Spiegel aufgestellt wird, die Experimentierleuchte wird durch eine Kerze ersetzt.

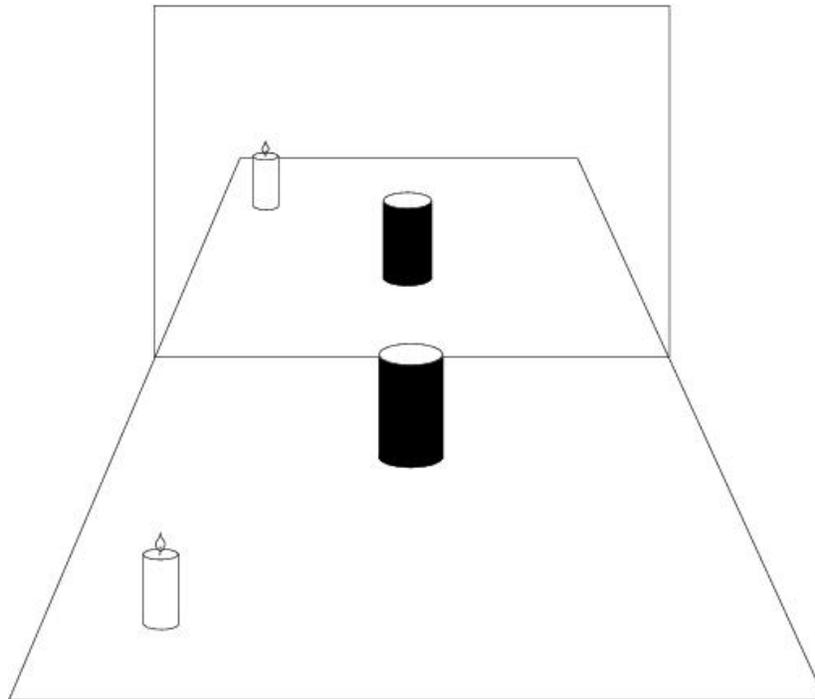
Dass die Spiegelkerze einen Schatten des Zylinders vor dem Spiegel wirft, ruft einiges Erstaunen bei den Schülern hervor, dass der von der realen Kerze am realen Zylinder erzeugte Schatten in die Spiegelwelt hineinfällt, ebenso. Allmählich werden alle erkennbaren Schatten von den Schülern beschrieben (vgl. [Sch94]) – nur zwei Schatten sind aufgrund der unvollständigen Abdunkelung kaum zu sehen, und zwar die Schatten von Kerze und Spiegelkerze, die im Licht der jeweils anderen Kerze entstehen. Diese Schatten bleiben daher unerwähnt.

Um die Ergebnisse festzuhalten wird von den Schülern eine Zeichnung angefertigt, die gezeichneten Schatten werden gemeinsam nummeriert und diese Nummern in eine Matrix eingetragen, aus der dann abgelesen kann, wie die Schatten entstehen (Arbeitsblatt in Abbildung 3.7 auf der nächsten Seite). Als sich herausstellt, dass zwei Felder in der Matrix leer bleiben, wollen die Schüler das Experiment noch einmal sehen, doch der Lehrer besteht darauf, vorher genauere Angaben zu den unbeobachteten Schatten machen zu lassen. Anschließend werden diese beiden Schatten im Experiment gesucht. Die Schüler sind sichtbar stolz darauf, dass ihre Vorhersage zutreffend war.

Auch in dieser Stunde bleibt bei den Schülern eine deutliche Skepsis gegenüber der Spiegelwelt vorhanden. Der Widerspruch, dass wir mit einer Spiegelwelt arbeiten, die es in Wirklichkeit gar nicht gibt, scheint unausgesprochen im Raum zu stehen. Nach der Stunde bemerkt ein Schüler: "Wenn ich hinter den Spiegel gucke, ist da keine Spiegelwelt. Die Spiegelwelt gibt es gar nicht." Es ist gut so, dass diese Skepsis da ist. Vielleicht fördert der Lehrer sie sogar, indem er mehrmals hervorhebt: "Die Gegenstände in der Spiegelwelt kann man zwar sehen, aber nicht anfassen!"

Arbeitsblatt:

Schatten in der Spiegelwelt

**Aufgaben:**

1. Trage deine Beobachtungen in die Skizze ein.
2. Ordne allen Schatten den richtigen Platz in der Tabelle zu, indem du die jeweilige Nummer aus dem Tafelbild einträgst

Schattenkörper \ Lichtquelle	Lichtquelle	
	Kerze	Spiegelkerze
Zylinder		
Spiegelzylinder		
Kerze		
Spiegelkerze		

Abbildung 3.7: Arbeitsblatt zur Spiegelwelt

Andererseits erfahren die Schüler dass die Spiegelwelt eine in vielen Fällen geeignete Beschreibungsweise ist. Schattenphänomene in der Spiegelwelt lassen sich genau so beschreiben, wie die Schüler es gewohnt sind. Das Prinzip Ameise sowie das zuvor unterrichtete Schema zur Beschreibung von Schatten werden von den Schülern mit dem Konzept der Spiegelwelt verknüpft. Sogar erfolgreiche Vorhersagen für Experimente lassen sich mit Hilfe der Spiegelwelt machen.

Fast unbemerkt haben wir damit begonnen, ein modernes Modellverständnis anzulegen, das bis in den Unterricht zur Quantenmechanik hinein tragfähig bleiben soll. An die Stelle anschaulicher, mechanistischer Modelle, zu denen aus unserer Sicht das Lichtstrahlmodell gehört, tritt eine abstrakte "Vorhersagekraft" der Theorie. So schrieb Paul A. M. Dirac, Mitbegründer der Quantenmechanik [Pie96]: "Die einzige Aufgabe der theoretischen Physik besteht darin, Vorhersagen zu machen, die sich mit der Erfahrung vergleichen lassen, und es ist durchaus unnötig, irgendeine befriedigende Beschreibung über den gesamten Verlauf der Vorgänge zu geben." Ganz offensichtlich ist die Spiegelwelt in der Hinsicht unbefriedigend, dass sie nicht ein greifbarer Teil der Wirklichkeit ist; mit Hilfe der Spiegelwelt lassen sich aber optische Erscheinungen bei der Reflexion zutreffend vorhersagen. Es könnte lohnend sein, dieses Verständnis explizit mit den Schülern zu diskutieren und auf diese Weise bewusst zu machen.

3.6 Das Spiegelgesetz

Durch eigenes Experimentieren sollen die Schüler nun herausfinden, wo sich die Gegenstände in der Spiegelwelt befinden. Mit Spiegelkacheln aus dem Baumarkt und Teelichtern lassen sich dazu einfache Experimente durchführen, wobei für das erste der Experimentierraum sehr gut abgedunkelt werden muss.

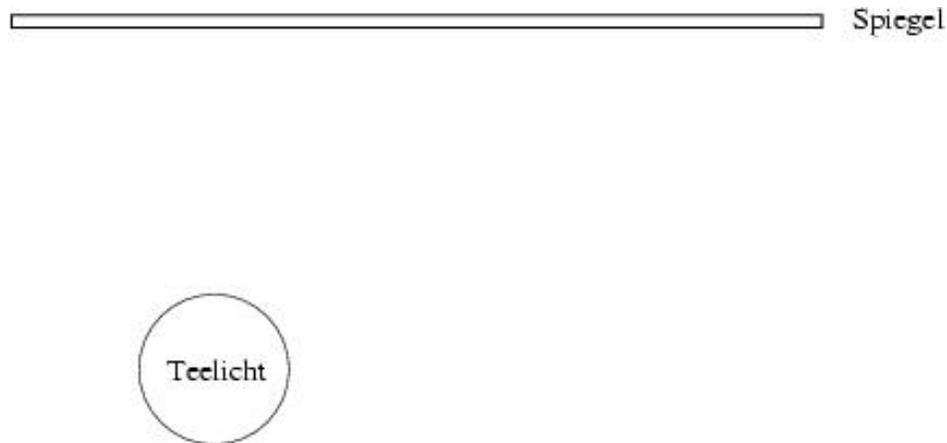
Die erste der beiden Schülerübungen führt die Schüler zu der Erkenntnis, dass sich das Spiegelteelicht hinter dem Spiegel befindet. Manche erkennen bereits, dass es sich etwa ebenso weit dahinter, wie das brennende Teelicht vor dem Spiegel befinden muss (siehe Abbildungen 3.8 und 3.9). Das gleiche gilt für nichtleuchtende Gegenstände. Wird nämlich das Teelicht ausgeblasen, ändert sich der Ort des Spiegelteelichts nicht.

In dem zweiten Experiment prüfen die Schüler, was "hinter dem Spiegel" bedeutet. Dazu führen sie Messungen mit dem Geodreieck durch. Ergebnis ist ein von den Schülern formuliertes Spiegelgesetz: "Der Spiegel halbiert die Verbindungslinie zwischen Teelicht und Spiegelteelicht und steht senkrecht zu ihr." (vgl. [Pie96]).

Der Lehrer schließt den mit dem Doppelschattenexperiment begonnenen Spannungsbogen, indem er die Folie mit den anfänglichen Vermutungen noch einmal präsentiert. Die Schüler korrigieren ihre frühere Darstellung und zeichnen Spiegelhand und Spiegellampe dem Spiegelgesetz entsprechend ein. Die Orte der Schatten an der Decke zu konstruieren, stellt nun keine ernsthafte Schwierigkeit mehr dar.

Arbeitsblatt:

Wo befindet sich die Spiegelkerze?



Material: 1 Spiegelkachel
1 Stativmuffe zum Aufstellen der Spiegelkachel
1 Teelicht
Streichhölzer (zum Anzünden und als Schattenkörper)
Stifte (zum Zeichnen)

Aufgabe:

Arbeitet in kleinen Gruppen zu zweit oder zu dritt zusammen. Stellt die Spiegelkachel auf der vorgezeichneten Linie und das Teelicht auf dem Kreis auf. Zündet das Teelicht nun an. Zeichnet diejenigen Schatten nach, die von der Spiegelkerze am Rand des Spiegels erzeugt werden. Verlängert nun die Schattengrenzen der gezeichneten Schatten in Richtung der Spiegelkerze. Was stellt ihr fest?

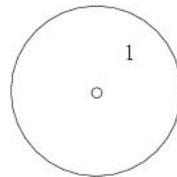
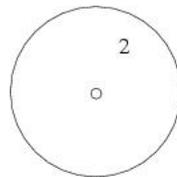
Abbildung 3.8: Schülerübung zum Spiegelgesetz. Die Kerze hinter dem Spiegel muss mit dem Spiegelbild der Kerze vor dem Spiegel zur Deckung gebracht werden.

Arbeitsblatt:

Die Spiegelgesetze

Stelle den Spiegel so auf, dass das in der Spiegelwelt zu sehende Bild von Kreis 1 mit dem "wirklich vorhandenen" Kreis 2 zusammenfällt.

Zeichne die Lage des Spiegels als Linie ein!



Ergebnisse:

1.

2.

Abbildung 3.9: Arbeitsblatt zum Spiegelgesetz.

In der ersten Schülerübung wenden die Schüler eine Arbeitstechnik an, die im späteren Optikunterricht noch größere Bedeutung bekommen wird: die Rekonstruktion des Verlaufs von Lichtwegen durch das Nachzeichnen von Schattengrenzen. Diese Darstellung von Lichtwegen tritt in unserem Unterricht an die Stelle des Zeichnens von Lichtstrahlen.

3.7 Ausblick: Lichtwegkonzept

Wenn der Anfangsunterricht die Hälfte des ganzen (Optik)unterrichts bilden soll, so müsste noch ebenso ausführlich über die andere Hälfte – den Unterricht in der Mittel- und Oberstufe – berichtet werden. Hier können wir nur in Kürze andeuten, an welchen Stellen in unserem Gesamtkonzept für die Optik Anknüpfungspunkte bestehen; für genauere inhaltliche Darstellungen sei auf die angegebene Literatur [Erb92, Erb95] verwiesen.

Im Mittelstufenunterricht greifen wir die Betrachtung von Lichtwegen wieder auf, deren Verlauf in Experimenten mit Hilfe von Schattengrenzen rekonstruiert wird. Die Untersuchung der optischen Weglängen von Lichtwegen führt zum Fermatschen Prinzip, aus dessen Perspektive die verschiedenen Phänomene der Geometrischen Optik betrachtet werden. Im Oberstufenunterricht lernen die Schüler mit dem Zeigerformalismus nach Feynman eine abstrakte Beschreibungsweise für das Licht kennen, die es gestattet, Interferenzphänomene zu beschreiben. Auch der Zeigerformalismus arbeitet mit Lichtwegen, so dass auf das Wellenmodell an dieser Stelle verzichtet werden kann. Im Vergleich zum Wellenmodell ist die Darstellung im Zeigerformalismus abstrakter und besitzt gleichzeitig eine größere Vorhersagekraft, beispielsweise bei der Berechnung von Intensitäten in Interferenzmustern. Dies unterstützt das von uns bereits im Anfangsunterricht angelegte Modellverständnis.

Mit dem Lichtwegkonzept liegt ein Unterrichtsgang für die gesamte Optik bis hin zur Atomphysik vor, dessen inhaltliche Struktur darauf ausgerichtet ist, den Wissensaufbau von Anfang an über mittlere und lange Zeiträume hinweg zu fördern. Als Ganzes wird es die angestrebte Wirkung auf den Wissensaufbau wohl am besten entfalten können. An diejenigen, die Optik neu unterrichten wollen, sei also eine Aufforderung Goethes gerichtet: "Lass den Anfang mit dem Ende / Sich in Eins zusammenziehn!"

Literaturverzeichnis

- [Bun96] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1996 . – S. 93
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295

- [Erb95] ERB, R.: Optik in der Oberstufe. In: *Physik in der Schule* 33 (1995), Nr. 2, S. 51–56
- [Hei95] HEINZERLING, H.: Vom Sehen zur Optik. In: *NiU-Physik* 6 (1995), Nr. 29, S. 11–15
- [Kiu00] KIUPEL, M.: Geometrische Optik – ohne Lichtstrahlen. In: *NiU-Physik* 11 (2000), Nr. 56, S. 44–46
- [Lic96] LICHTFELDT, M.: Lernweg einer Schülerin – Einzelfallstudie aus dem Langzeit-Forschungsprogramm "Wege zum Atombegriff". In: DUIT, R. (Hrsg.) ; RHÖNECK, Chr. (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel, 1996, S. 324–352
- [Pie96] PIETSCHMANN, H. *Phänomenologie der Naturwissenschaft*. 1996
- [Sch83] SCHÖN, L.: Physik erleben! Beispiele aus der Optik. In: A. SCHARMANN, u.a. (Hrsg.): *Vorträge der Frühjahrstagung der DPG FA Didaktik*. Gießen, 1983, S. 79–87
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Wag92] WAGENSCHNIG, M. *Verstehen Lehren: Genetisch – Sokratisch – Exemplarisch*. 1992
- [Wie94] WIESNER, H.: Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. In: *NiU-Physik* 5 (1994), Nr. 22, S. 7–15

Veröffentlichung 4

Die Schusterkugel

Roger Erb, Lutz Schön

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: K. H. Wiebel (Hrsg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vortrag der GDGP-Tagung in Weingarten 1990*. S. 291-293.

Früher wurde von Handwerkern bei Feinarbeiten, etwa in der Schusterwerkstatt, eine hohle, wassergefüllte Glaskugel benutzt, um das Licht einer Kerze so zu bündeln, dass in dem Schein ein Arbeiten möglich wurde. Füllt man eine solche Kugel im Schein einer Leuchte, kann man einige interessante Phänomene beobachten.

Im Licht eines Diaprojektors wirft die leere Kugel einen transparenten "Schatten" an die Wand. Wir füllen die Kugel langsam mit Wasser und sehen den Wasserspiegel steigen, in der Projektion aber scheint die Kugel leer zu bleiben. Erst wenn sie schon zu einem guten Teil gefüllt ist, steigt ein dunkler Schatten über den transparenten. Dieser wächst dann aber schnell, so dass die zur Hälfte gefüllte Kugel auch in der Projektion halb gefüllt erscheint. Auch wenn wir weiter Wasser hinzugießen, steigt der Flüssigkeitsspiegel im Schattenbild schneller als in der wirklichen Kugel. Schließlich sehen wir beim Blick an die Wand eine scheinbar vollständig gefüllte Kugel, in die weiter Wasser gegossen wird, ohne dass sie überläuft.

Um das beschriebene Phänomen zu verstehen, blenden wir den Schein der Lichtquelle soweit ab, dass nur die gefüllte Kugel beleuchtet wird. An der Wand sehen wir dann einen hellen Schein, welcher deutlich größer als das zuvor gesehene Schattenbild der Kugel ist. Bisher fiel er uns nicht auf, da er durch das Licht des Projektors überblendet wurde. Ein Schattengeber, eingebracht zwischen Kugel und Wand, erzeugt einen Schatten, der schnell wächst, wenn sich der Schattengeber der Kugel nähert. Befindet sich der Schattengeber an einem bestimmten Punkt, füllt der Schatten den ganzen Schein aus, um bei weiterer Annäherung wieder kleiner zu werden. Jetzt aber ist er kopfstehend und seitenverkehrt. Daraus schließen wir, dass die Lichtwege hinter der Kugel gekreuzt sind (Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite). Die gefüllte Kugel zeigt also eine das Licht in einem Bildpunkt sammelnde Wirkung.

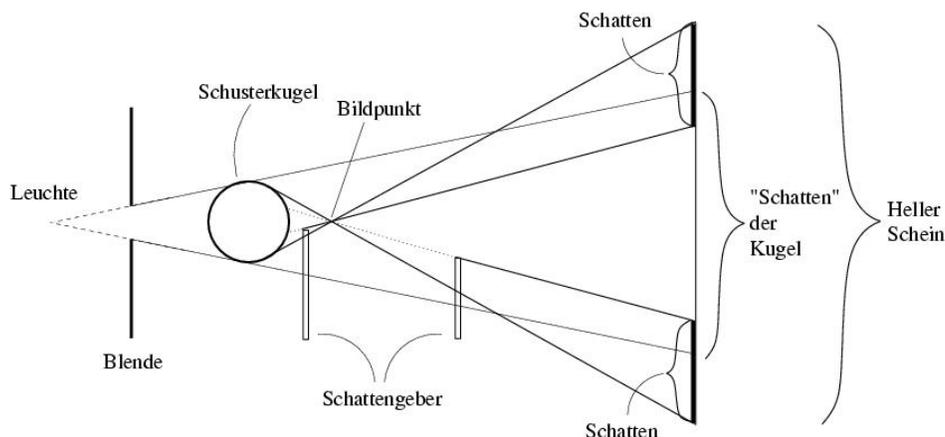


Abbildung 4.1: Schusterkugel

Betrachten wir nun die leere Kugel im abgeblendeten Lichtbündel, so sieht man, dass auch sie einen hellen Schein erzeugt. Das Bild eines eingebrachten Schattengebers ist aber nie umgekehrt, folglich können die Lichtwege nicht gekreuzt sein. Die leere Kugel hat zerstreue Wirkung.

Beim erneuten Füllen zeigt sich im abgeblendeten Bündel, dass auch eine kleine Wassermenge schon einen Schatten bewirkt (Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite). Dieser liegt aber aufgrund der zerstreuen Wirkung der leeren Kugel noch weit außerhalb des zu Beginn gesehenen Schattenbildes der Kugel.

Wir vergleichen also den Schatten des Wassers im Licht des Bildpunktes mit dem von der wirklichen Lichtquelle erzeugten Schatten der Kugel und sahen deshalb das zu Beginn geschilderte Phänomen.

Aus den Versuchen können wir als charakteristisches Merkmal für einen Körper mit Licht sammelnder Eigenschaft festhalten, dass er am Rand dünner als in der Mitte sein muss. Beim Vergleich mit Sammellinsen, wie sie in optischen Geräten benutzt werden, findet man dieses Merkmal wieder.

Die zerstreue Wirkung der leeren Kugel lässt sich mit Hilfe eines Modellexperimentes verstehen (Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite). Lenkt man das Lichtbündel eines Lasers durch einen möglichst dickwandigen Standzylinder und verschiebt diesen quer zur Richtung des Lichtstrahls, so wandert der Lichtpunkt auf dem Schirm umso schneller, je näher man dem Rand des Zylinders kommt. Ein ähnliches Experiment, bei dem man den Lichtweg im dichten Medium direkt sehen kann, lässt sich mit einer sich zwischen zwei konzentrischen Glasrohren befindenden Wasserschicht durchführen. Man kann das Ergebnis durch Berechnen des Lichtweges mit dem Brechungsgesetz bestätigen.

Eine Hilfe zum Verständnis bietet das Fermatsche Prinzip. In einer sehr vereinfachten Form vergleicht man die Weglängen, die das Licht im Glas zurücklegt. Am Rand der leeren Ku-

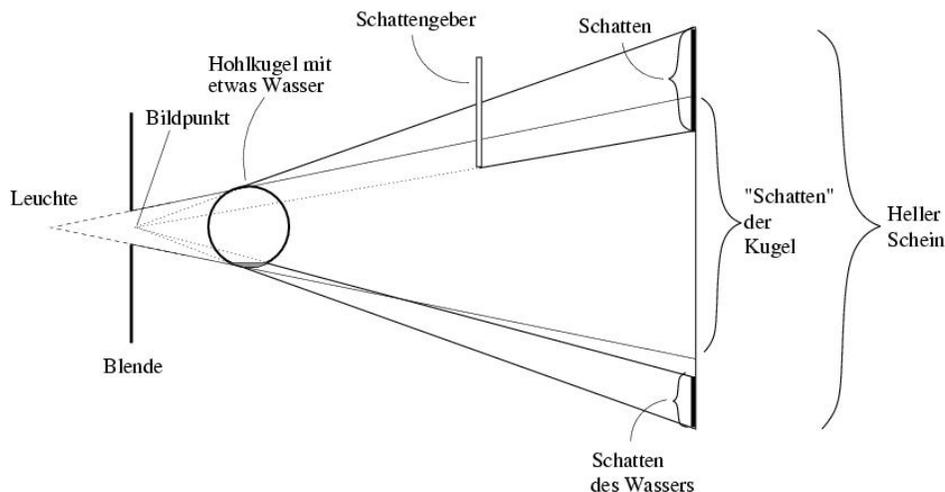


Abbildung 4.2: Hohlkugel mit etwas Wasser

gel muss das Licht einen längeren Weg durch Glas gehen als in der Mitte. Dieses Ergebnis lässt sich als charakteristische Eigenschaft auch bei Konkavlinen wiederfinden: Ein das Licht zerstreuer Körper ist in der Mitte dünner als am Rand. Zur Weiterführung können wir uns Plankonvexlinsen als Abschnitte einer vollen Kugel vorstellen; Zerstreungslinsen sind Abschnitte der leeren Kugel (Uhrgläser) oder bekommen ihre dann technisch genutzte Form.

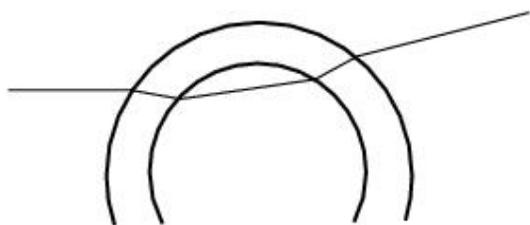


Abbildung 4.3: Lichtbündel eines Lasers im Durchgang durch einen dickwandigen Standzylinder

In der Schule wird die Linsenoptik behandelt, nachdem zuvor die Brechung an planparallelen Platten und Wasseroberflächen untersucht worden ist. Dabei wird anhand einiger ausgezeichneter Strahlen die Wirkung von Konkav- und Konvexlinsen bearbeitet, ohne dass den Schülern und Schülerinnen jedoch deutlich wird, warum gerade solche Körper verwendet werden. Nach unserer Meinung bieten hier die Experimente mit der

Schusterkugel neben der entstehenden Motivation die Möglichkeit, die zerstreuende und sammelnde Wirkung von Körpern einzuführen und somit phänomenorientiert in das Gebiet der Linsenoptik einzusteigen. Sich den Lichtdurchgang durch Körper, wie sie von uns verwendet wurden, zu betrachten, liegt nahe, denn sie kommen auch in der außerschulischen Welt vor; Gegenstände wie Vasen, Weingläser, Karaffen oder Rundkolben können für die Experimente benutzt werden.

Veröffentlichung 5

Curved Mirrors

Roger Erb

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: *Physics Education* 30. S 287-289)

Introduction

The exact observation of a candle flame in front of an behind a flat mirror teaches a number of fundamental mirror characteristics. Those who use a curvable mirror for the experiment can go even further into the question of real-image formation at a concave mirror.

5.1 Image formation and geometrical optics

During lessons pupils are usually taught how to construct real images at a concave mirror. To do this, light beams and the law of reflection are employed and size and position of the image are obtained graphically. However, this method does not explain the image appearing at all and also at a specific spot, because geometrical optics neglects the intensity. This very question, however, is of interest during lessons and we will attempt to track down its solution. To achieve this, we would like to observe the following rules.

- (a) We introduce, as a physical principle, that the intensity will be higher at those spots which the light can reach on several paths;
- (b) this, together with Fermat's law, will then be used to develop the form of a light-collecting concave mirror.

- (c) A candle serves as a light source, as it provides a natural light and also, if needed, a point source. Furthermore, it simplifies the proof of the similarity between object and image, for instance by blowing on the flame.

5.2 The flat mirror

If one puts a candle in front of a flat mirror it is possible to find the position of the mirror image of the candle – the "mirror candle"; looking down on the experimental set-up provides a clear view of the shadow boundaries a and b of the mirror (figure 5.1). The candle is at the intersection of their reversed-direction extensions (a' and b'). The boundaries of the reflected diverging light beam c and d appear somewhat weaker because they are in an area of higher intensity. Extending them beyond the mirror yields the position of the mirror candle at their intersection.

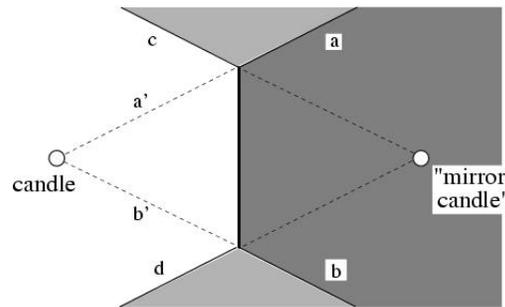


Abbildung 5.1: Position of the candle and the image at the flat mirror (top view)

5.3 The curved mirror

The above rule also applies to curved mirrors. The demonstration requires a mirror of pliable Plexiglass (or equivalent material) which is at least as big as a sheet of writing paper (A4). A sheet of Plexiglass such as that bought for decorative purposes will be sufficient. As in the experiment with the flat mirror, no narrow light beams should be employed as a "light ray" for illustration purposes; rather the whole, natural light of the candle should be observed. Just as with the flat mirror the curved mirror shows the position of the "mirror candle" at the intersection of the extended boundaries of the reflected light beam (figure 5.2). With increased curving, the reflected light beam acquires parallel boundaries: the position of the mirror candle is infinitely far away. Even stronger curving causes the

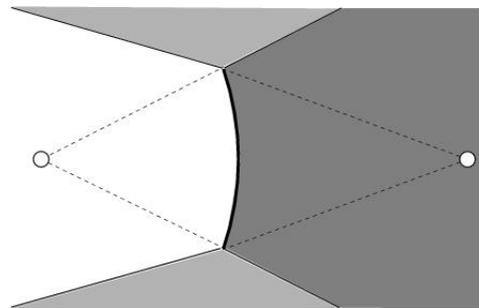


Abbildung 5.2: Position of the candle and the image at the slightly curved mirror (top view)

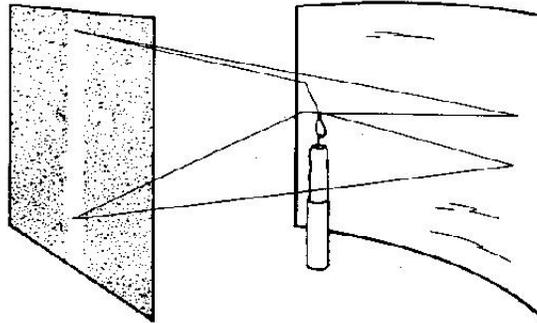


Abbildung 5.3: A bright line of light appears at the screen

boundaries of the reflected light to intersect in front of the mirror. Thus, the "mirror candle" returns from infinity – but to the candle's side of the mirror. In this case, the position of the "mirror candle" is one of particularly increased intensity as many light paths intersect here which extend from the candle to this position via the mirror. This is possible, because all these light paths (or at least their projection onto the observation surface) have equivalent path lengths and consequently the light cannot "select" the shortest path (respectively the one of least time), as a law which describes the spreading of light – Fermat's Law – demands. Feynman concludes: "The only way that the light can be perfectly satisfied to take several adjacent paths is to make those times equal! Otherwise, it would select one of least time." [FLS65].

5.4 Image formation

If one places a screen at the position of the light paths' intersection, a bright vertical line of light appears there – and not a point of light or an image of the mirror candle (figure 5.3). This happens because light paths of equal length are available from the light source to points at any height on the line (namely, via areas of varying height on the mirror). One can now remove most of the light paths so that the light comes to the screen only via a determined height of the mirror, by placing a screen with a horizontal slit directly in front of the mirror and then bending the mirror and this screen together. One now receives a real image of the candle (figure 5.4). In this manner, the correct form of an image-forming mirror can be worked out together with pupils. The principle of this mirror also works for a lot of similar problems. To collect the light coming out of one point in another point, we use a mirror made in the shape of an ellipse. The mirror used in the experiment has approximately that form. A paraboloidal mirror gathers the light of sources like the sun or the stars light years away. Even the focussing effect of lenses can be understood, if we know the velocity of the light in the lens medium.

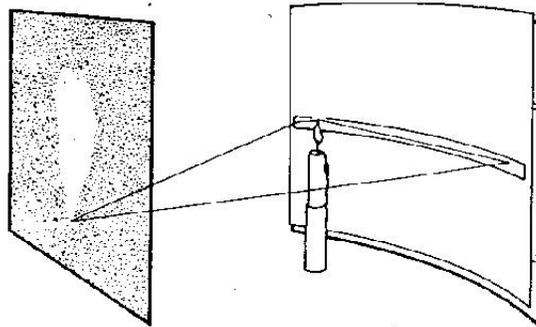


Abbildung 5.4: Using a screen with a horizontal slit directly in front of the mirror, we are producing a real image of the candle

Literaturverzeichnis

- [FLS65] FEYNMAN, R. P. ; LEIGHTON, R.B. ; SANDS, M.: *The Feynman Lectures on Physics*.
Reading : Addison-Wesley, 1965

Teil II

Fermat-Optik

Veröffentlichung 6

Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip

Roger Erb

(aus: *Physik in der Schule* 30 (1992) 9, S. 291-295.)

6.1 Optik in der Sekundarstufe I

Der Optik kommt in der Abfolge der Themen im Physikunterricht ein besonderer Stellenwert zu. Da sie meist am Anfang steht, treten die Vorstellungen und Interessen der Schüler in einen ersten Kontakt mit der Physik. Wie Erfahrungen von Physiklehrern zeigen und Untersuchungen [LHG85] belegen, werden die Schüler dabei häufig enttäuscht. Ein Grund dafür ist sicher, dass die Anbindung an die außerschulische Welt nur beiläufig stattfindet. Auch Spaß am Verstehen der Inhalte zu bekommen ist schwierig, besonders in der geometrischen Optik, wo innerhalb des Themas Gesetze und Regeln scheinbar unabhängig nebeneinander stehen. Wenn zudem das Gelernte im weiteren Schulleben, selbst in der Oberstufenoptik, keine Rolle spielt, kann ein Schüler kaum motiviert werden, sich intensiv mit der Thematik zu befassen.

Gerade aber weil die Mittelstufenoptik ein in sich begrenztes Gebiet darstellt, bietet sie auch die Möglichkeit, andere Unterrichtsansätze zu versuchen, ohne in Konflikt mit dem Lehrplangebäude zu kommen. Der Vorschlag "Vom Sehen zu Optik" versucht deshalb, die ganze Mittelstufenoptik aus lebensnahen Phänomenen zu entwickeln; der Teil, der sich mit der geometrischen Optik befasst, ist im folgenden ausgeführt. Er kann auch in den üblichen Optikunterricht integriert werden.

6.2 Einbindung der geometrischen Optik in "Vom Sehen zur Optik"

In Kassel wird an einer Konzeption "Vom Sehen zur Optik" gearbeitet, die versucht, möglichst viele der Inhalte auf Phänomene zu gründen [Sch]. Dabei sollen Sichtweisen, Methoden und Gesetze weitgehend Zusammenhänge erkennen lassen, um ein tiefes Verständnis zu ermöglichen. Auf der ersten Stufe wird, ausgehend von grundlegenden Erfahrungen mit Licht und Schatten, eine Optik bis hin zur Behandlung von Linsen entwickelt, für die nicht das Modell des Lichtstrahls benötigt wird. Dabei spielt der Beobachter eine besondere Rolle, und es wird zunächst ein vermeintlich subjektives Ergebnis erzeugt, das aber leicht in allgemeine Erkenntnisse mündet, ohne das Erlebnis der eigenen Erfahrung zu verwischen.

Die geometrische Optik entfernt sich in ihrer Idee ein Stück weit von diesem Ansatz, da auf eine eher abstrakte Weise eine Eigenschaft des Lichtes oder – mehr technisch – der verwendeten Bauteile beschrieben wird. Darin liegt auch eine wesentliche Motivation: Das sicher nicht unkritisch einzuführende Modell des Lichtstrahls erlaubt Konstruktionen, die zu nachprüfbaren Ergebnissen führen und so einen Aspekt der Arbeitsweise der Physik verdeutlichen.

Aber auch in der geometrischen Optik kann, wie mit unserem Vorschlag deutlich gemacht werden soll, von dem direkt Erfahrbaren ausgegangen werden. Die Beziehung Beobachter – Gegenstand bekommt dabei eine besondere Bedeutung. Häufig wird im Sinn eines Spiralcurriculums an den vorhergehenden Teil angeknüpft; die Suche nach einem allgemeinen Erklärungsprinzip gewinnt aber die Oberhand. Das Fermat-Prinzip, dessen Verwendung im Physikunterricht u.a. auch in [Dru73] und [Ras83] vorgeschlagen wurde, ist dieses allgemeine Erklärungsprinzip, aus dem als Grundaussage weitere Gesetze abgeleitet werden können. Eine Anregung, mit dem gleichen Gedanken die Linsenoptik einzuleiten, wurde von uns 1991 veröffentlicht [ES91]. Im weiteren Unterrichtsverlauf können wie bisher Konstruktionen durchgeführt werden, wobei jetzt aber das Modell des Lichtstrahls – und damit die Funktion der ausgezeichneten Strahlen – als Lichtweg eine neue Bedeutung erlangt hat.

6.2.1 Thematische Abfolge der geometrischen Optik

- Geradlinige Ausbreitung

Fermat-Prinzip

- Reflexion

Bildentstehung

- Konstruktion von Bildern am Spiegel

- optische Hebung
 - Messung der Lichtgeschwindigkeit
 - Brechung
 - Konstruktion von Bildern an Linsen
- (Vorbereitung durch "Vom Sehen zur Optik")

6.3 Das Fermat-Prinzip

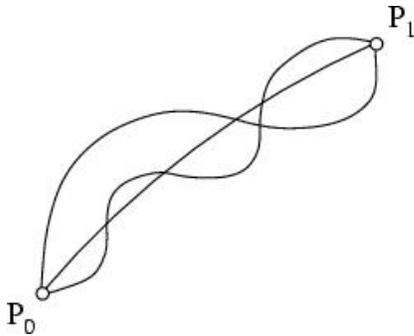


Abbildung 6.1: Verschiedene Wege im optisch inhomogenen Medium

Das Prinzip des kürzesten Lichtweges war schon seit der Antike bekannt [Hun78]. Fermat erweiterte es auf die Brechung und fand damit einen wichtigen Baustein für die Entwicklung der Variationsrechnung. Das Fermat-Prinzip in seiner allgemeinen Form ist ein Variationsprinzip und macht eine Aussage über den Lichtweg zwischen zwei Punkten. Es beurteilt damit das Problem der Lichtausbreitung final (Betrachtung des Gesamtzusammenhanges) und nicht kausal (z.B. welcher Reflexionswinkel sich für das unter einem bestimmten Winkel auf einen Spiegel fallende Licht ergibt).

Die Länge *OWL* (optische Weglänge) des Lichtweges hat im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen einen Extremwert, in den meisten Fällen ein Minimum. Im homogenen Medium ist der Lichtweg folglich eine Gerade. Bei Brechung wird der Lichtweg mit der Brechzahl gewichtet:

$$OWL = \sum_i n_i l_i = \text{Extr.} \quad \text{oder}$$

$$\delta \sum_i n_i l_i = 0 \quad (\text{die Variation verschwindet})$$

Bei sich stetig änderndem Brechungsindex gilt

$$\int_{P_0}^{P_1} n dl = \text{Extr.}$$

Da $dl = \frac{c_0}{n} dt$, kann auch $\int_{P_0}^{P_1} n dt = \text{Extr.}$, das Prinzip der kürzesten Laufzeit, formuliert werden (Abbildungen 6.1 bis 6.3).

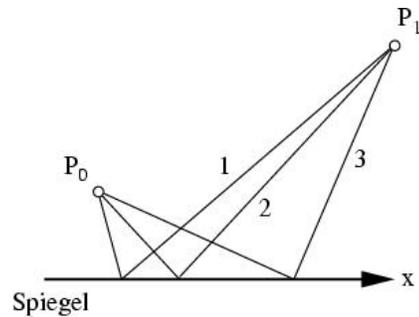


Abbildung 6.2: Verschiedene Wege für die Reflexion am ebenen Spiegel

Formal ergibt sich eine Analogie zum Hamilton Prinzip der kleinsten Wirkung, physikalisch zeigt sich die Nähe zur Bedingung für die Bildentstehung: Sind zwei oder mehr gleichlange Lichtwege zwischen zwei Punkten möglich, ist der eine ein Bild des anderen [Hof80].

Hierbei werden aber reale Lichtwege in Verbindung miteinander gebracht; im Gegensatz dazu beim Fermat-Prinzip gedachte benachbarte Wege. Infolgedessen kann die Bedingung für die Bildentstehung nicht aus dem Fermat-Prinzip abgeleitet werden. Ihre Begründung finden beide außerhalb der geometrischen Optik mit der Betrachtung von Phasenbeziehungen verschiedener Lichtwege. Die gesamte geometrische Optik kann auf der Basis des Fermat-Prinzips entstehen. Die schnellste Verbindung zwischen zwei Punkten ist im homogenen Medium eine Gerade. Es ist das Grundwesen des Lichtes in der geometrischen Optik, dass es sich geradlinig ausbreitet. Diese Erfahrung ist so tief in uns verankert, dass man eher die Geradlinigkeit über die Ausbreitung des Lichtes definieren kann.

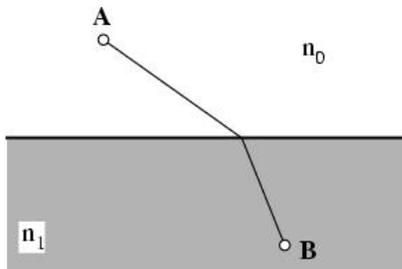


Abbildung 6.4: Lichtweg an der Trennfläche

Der Fall der Brechung an einer Grenzfläche ist in Abbildung 6.4 skizziert. Die kürzeste Verbindung zwischen den Punkten A und B ist nun keine Gerade. An der Grenzfläche entsteht ein Knick; die Teile müssen wie im allgemeinen Fall mit der Brechzahl gewichtet werden. Nun muss deutlich vom optisch kürzesten oder schnellsten Lichtweg gesprochen werden, denn die unterschiedliche Lichtgeschwindigkeit in beiden Medien spielt die entscheidende Rolle. Ähnlich würde jemand, der möglichst schnell von einem Punkt A auf dem Land zu einem Punkt B im Wasser gelangen möchte, den Weg so wählen, dass er im Vergleich zum direkten Weg ein längeres Stück auf dem Land wegen der dort höheren Fortbewegungsgeschwindigkeit zurücklegen könnte.

Mathematisch reduziert sich im Fall der Reflexion und der Brechung an einer Grenzfläche das Variationsproblem wieder zu einer Extremwertaufgabe, die mit Hilfe geometrischer Überlegungen oder mit einem Modellexperiment gelöst werden kann. Analytisch gelingt dies nach der Einführung der Differentialrechnung erst in der Sekundarstufe II.

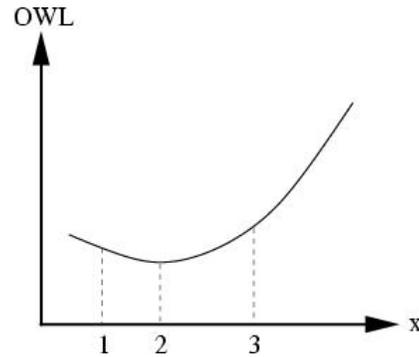


Abbildung 6.3: Optische Weglänge für verschiedene Lichtwege aus Abbildung 6.2 auf der vorherigen Seite. Der wirkliche Lichtweg ist extremal. Seine Variation verschwindet; eng benachbarte Lichtwege sind etwa gleichlang.

6.4 Durchführung im Unterricht

6.4.1 Geradlinige Ausbreitung

Wir greifen auf schon im ersten Teil von "Vom Sehen zur Optik" gemachte Erfahrungen mit Schattengrenzen zurück. (Auf solche Erfahrungen wird noch häufiger zurückgegriffen. Hier werden dann nur kurz die betreffenden Bezüge dargestellt.) Es kommt darauf an, deutlich zu machen, dass der Begriff "Geradlinigkeit" und die Ausbreitung des Lichtes eng miteinander verbunden sind. Blickt man direkt zu einer Kerze, kann man den Blickweg und damit auch den Lichtweg durch Zwischenstellen von Blenden festhalten. Ein durch diese Blenden gelegter Faden verdeutlicht, dass das Licht den kürzesten Weg nimmt, denn auch ohne Blenden zeigt der gespannte Faden zwischen Kerze und Beobachter den gleichen Weg an. Es wird dadurch die erste Formulierung der Fermat-Prinzips plausibel:

Das Licht breitet sich längs des kürzesten Weges zwischen zwei Punkten aus.

6.4.2 Reflexion

Das so gefundene Prinzip soll nun den Stellenwert eines Gesetzes bekommen und anhand weiterer Phänomene überprüft werden. Wir untersuchen dazu das Bild einer Kerze, welches der Betrachter im Spiegel sieht. Den Überlegungen des ersten Teils folgend kann man weite Teile des Spiegels abdecken und so den Bereich finden, in dem der Betrachter die Kerze sieht. Es ergibt sich der in Abbildung 6.5 dargestellte Zusammenhang. Der Lichtweg über den Spiegel ist zwar länger als der direkte zur Kerze, aber er ist doch zumindest der kürzere über den Spiegel. Denn der Weg \overline{BCD} ist eine Gerade, also nicht mehr zu verkürzen, und da $d_1 = d_2$, ist auch $\overline{ACD} = \overline{BCD}$.

So ergibt sich aus dem Fermat-Prinzip und geometrischen Überlegungen auch das Reflexionsgesetz, dass $\beta = \beta'$ und $\alpha = \beta$ somit $\gamma = \gamma'$. Außerdem wird deutlich, dass A, C und D in einer Ebene liegen müssen. In einem Arbeitsblatt (Abbildung 6.8 auf Seite 70) kann durch Ausmessen der tatsächliche Lichtweg mit möglichen anderen verglichen werden.

Experimentell prüfen wir das durch eine lange, zwischen zwei Pinnadeln an einer Korkwand aufgehängten Kette nach. Diese Kette wird jetzt anstelle des vorher benutzten Fadens gespannt, damit Wegeinheiten anhand der Perlen ausgezählt werden können. Sie veranschaulicht den Lichtweg zwischen Kerze, Beobachter und Spiegelfläche, dargestellt durch eine aufgeklebte Linie, die sie in einem Punkt berührt. Verschiebt man nun diesen Spiegelpunkt x , stellt

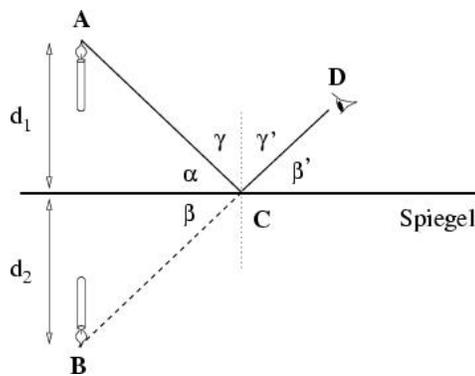


Abbildung 6.5: Blickweg \overline{BCD} und Lichtweg \overline{ACD} bei der Reflexion

man fest, dass die zwischen A , B und x gespannte Kette unterschiedlich lang sein muss. Der Punkt x , bei dessen Benutzung die Kette am kürzesten ist, entspricht dem Spiegelpunkt C in Abbildung 6.5 auf der vorherigen Seite, die Länge der "richtigen" Länge \overline{ACD} .

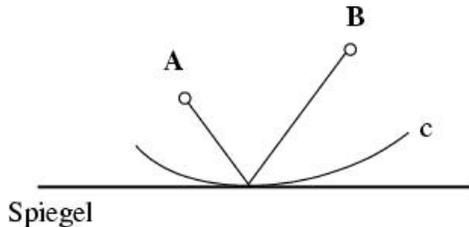


Abbildung 6.6: Entwicklung des Ellipsenspiegels

Hält man nun die Kettenlänge fest und bewegt den Knickpunkt der Kette nach links und rechts, so hebt sich dieser von der Spiegelfläche ab und beschreibt die in Abbildung 6.6 mit c bezeichnete Kurve, einen Abschnitt einer Ellipse, deren Brennpunkte A und B sind. Es gibt dann mehrere gleichlange Lichtwege von A über c nach B . Am ebenen Spiegel findet man außer dem Schein der Kerze auch noch einen Schein der gespiegelten Kerze. Jeder Betrachter, der sich innerhalb dieses Scheins befindet, sieht die Spiegelkerze. Biegt man nun den Spiegel, so verkleinert sich der Schein der Spiegelkerze und wird dabei heller. Man kann eine helle, schmale Lichtlinie auf die Wand werfen oder aber in das Auge eines Betrachters. Der so leicht Geblendete sieht nun im Spiegel je nach Biegung eine helle Kerze, viele Kerzen oder den Spiegel von einem hellen Schein erfüllt. Bei ihm kommt also mehr Licht an als zuvor, und zwar über verschiedene Punkte des Spiegels, also verschiedene Lichtwege. (Die Frage, ob es zwingend ist, dass ein Spiegel genauso geformt ist, um Licht an einem Punkt zu sammeln, lässt sich mit dieser Erkenntnis nicht beantworten. Auch mit einer Vielzahl von einzelnen Planspiegeln oder einer Fresnellinse lässt sich Licht sammeln, ohne dass die Lichtwege gleichlang sind. Die Frage nach der Form deines Spiegels ist eher kausal und entspricht so dem Reflexionsgesetz und nicht Bedingungen, die dem Fermat-Prinzip verwandt sind.)

Die Lichtlinie zeigt an, dass das Licht lediglich in einer Ebene gesammelt wird, weil der Spiegel sich immer nur zu einem Zylinder biegen lässt. Könnte man den Spiegel zugleich auch in der anderen Richtung biegen, würde aus der Linie ein Lichtpunkt. Wir ersetzen die fehlende Biegung durch eine Schlitzblende aus Papier vor dem Spiegel, die mitgebogen wird. Man erhält tatsächlich nicht einen der Breite der Schlitzblende entsprechenden Lichtpunkt, sondern ein relativ scharfes Bild der Kerzenflamme. Die Blende hat die fehlende Biegung wie eine Lochkamera für nur eine Dimension ersetzt. Ermöglicht man also mehrere gleichlange Lichtwege zwischen zwei Punkten, so ergibt sich nicht nur ein hellerer Punkt, sondern es entsteht ein Bild.

Gibt es mehrere gleichlange Lichtwege zwischen zwei Punkten, so entsteht an einem ein auffangbares Bild des anderen.

Um das in alle Richtungen der Ebene ausgesendete Licht zu nutzen, kann man Spiegelfolie längs einer Ellipse biegen. Dass dadurch gleichlange Wege erzeugt werden, zeigt man geometrisch einfach mit der Fadenkonstruktion ("Gärtnerkonstruktion"). Das Ergebnis mit einer in einem Brennpunkt stehenden Glühlampe mit einem kleinen, runden, geschlitzten Schirm zeigt

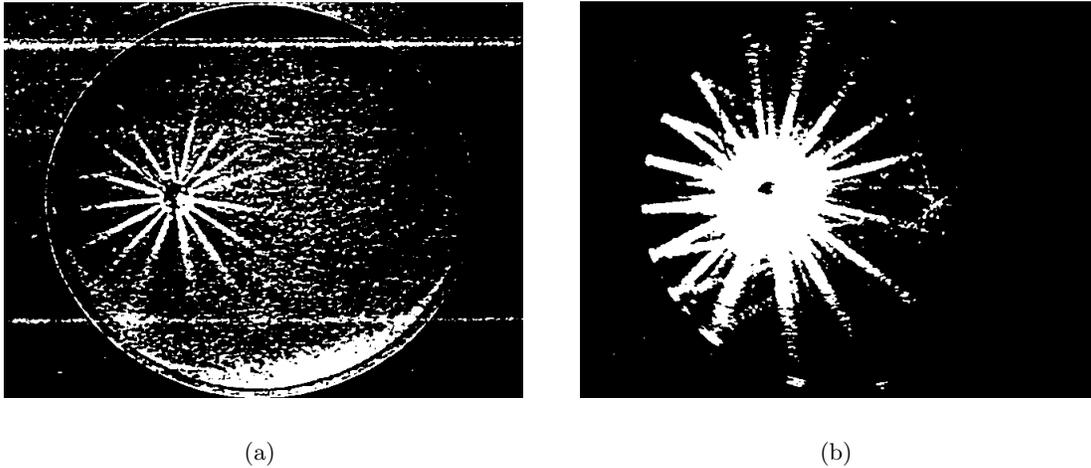


Abbildung 6.7: Abbildungen im elliptischen Spiegel

Abbildung 6.7. Dreidimensionale elliptische Spiegel bilden genau einen Punkt in einen anderen ab, parabolisch einen unendlich weit entfernten. In jedem Punkt an der Spiegelfläche gilt für die Lichtwege das Reflexionsgesetz bezüglich der Tangente an der Kurve in diesem Punkt. Im schulüblichen, weiteren Verlauf können jetzt Konstruktionsaufgaben am häufig verwendeten Kugelspiegel durchgeführt werden, für den die gezeichneten "Strahlen" besondere, einfach zu konstruierende Lichtwege sind.

6.4.3 Brechung

Experimente mit Brechung an einer Grenzfläche zeigen, dass der Lichtweg einen Knick bekommt. Schon im ersten Teil haben die Schüler Erfahrungen mit unterschiedlichen Medien gemacht, dabei wurde mit dem Phänomen der optischen Hebung eine Brechzahl für Wasser, Glas und Luft eingeführt. Das Ziel ist jetzt, die durch das Brechungsphänomen aufgeworfene Problematik für die Formulierung des Fermat-Prinzips zu nutzen. Dazu muss man ernst machen mit dem Ausbreitungsgedanken: Kürzester Weg muss nicht unbedingt geometrisch kürzest bedeuten, wenn man an das Beispiel mit der Fortbewegungsgeschwindigkeit eines Menschen an Land und im Wasser denkt. Den richtigen Lichtweg finden die Schüler, wenn sie die Stelle der Wasseroberfläche suchen, durch die man zu einem Gegenstand im Wasser blickt. Mit diesem Punkt, dem Beobachtungsort und der von der Seite zu sehenden oder zu tastenden tatsächlichen Lage des Gegenstandes ist der Lichtweg festgelegt. Ein auf die Wasseroberfläche gelenktes Lichtbündel bestätigt das Ergebnis. Nun lässt sich auch ohne Messung aus Überlegungen schließen, dass die Lichtgeschwindigkeit in Wasser oder Glas niedriger als in Luft ist. Würde in Abbildung 6.4 auf Seite 64 das Licht sich längs einer Geraden von A nach B ausbreiten, nähme es den geometrisch kürzesten Weg. Bei gleicher Ausbreitungsgeschwin-

digkeit in beiden Medien wäre dies auch der schnellste Weg. Im einfachsten Fall entsprechen also diese beiden Formulierungen der Extremalbedingung. Die Entsprechung wird für den allgemeinen Fall übernommen, und so soll eine Verlängerung des Weges in Luft verbunden mit einer Verkürzung in Wasser trotz des geometrisch längeren Weges eine Verkürzung der Gesamtlaufzeit bewirken. Deshalb muss die Lichtgeschwindigkeit in Wasser niedriger sein als in Luft, und das Fermat-Prinzip wird erweitert.

Breitet sich das Licht durch verschiedene Medien aus, muss seine Geschwindigkeit berücksichtigt werden. Das Licht breitet sich längs des Weges mit der kürzesten Laufzeit aus.

An der Korkwand lässt sich das Ergebnis wieder durch einfaches Abzählen von Kettengliedern zeigen. Die Glieder müssen jetzt nur entsprechend dem Geschwindigkeitsverhältnis verschiedene Abstände haben. Das wird dadurch erreicht, dass die Kette aus zwei Hälften besteht, wobei für die Brechung Luft – Glas in dem zur Luft gehörenden Teil der Kette jedes dritte Kettenglied eine andere Farbe und in dem zum Glas gehörenden Teil jedes zweite Kettenglied eine andere Farbe hat. Die Abschnitte stellen also den in einer bestimmten Zeiteinheit zurückgelegten Weg dar. Die Kette wird gemäß Abbildung 6.4 zwischen den Pinnadeln A und B gespannt, wobei die Mitte der Kette (die Grenze zwischen den verschiedenen Wegabschnitten) auf der Trennfläche zwischen den Medien, symbolisiert durch die gerade Linie, gehalten wird. Nun werden die markierten Glieder für verschiedene Schnittpunkte x mit der Trennlinie gezählt, dabei muss die Kette nach A und B jeweils neu gespannt werden. Der Weg mit den wenigsten markierten Kettengliedern entspricht dem tatsächlichen. Die Schüler können das selbst auf einem Arbeitsblatt unter Verwendung entsprechend veränderter Maßstäbe für das dichtere Medium nachvollziehen. Die Verwendung eines Funktionsmodells, wie es Mach [Mac21] vorgeschlagen hat, ist wegen der eher erschwerenden Übertragung auf die Mechanik nicht vorgesehen.

Der Weg des Lichtes beim Übergang von einem Medium zu einem anderen, aus dem das Brechungsgesetz abgelesen werden kann, ist somit auf das Fermat-Prinzip zurückgeführt.

6.5 Resümee

In der vorgestellten Konzeption wurde angestrebt, Aussagen über das Wesen des Lichtes, also die Ausbreitung längs des schnellsten Weges und die Lichtgeschwindigkeit, zum Unterrichtsinhalt zu machen. Diese Aussagen selbst müssen als natürliche Eigenschaften des Lichtes angesehen werden, sie können auf dieser Ebene nicht weiter hinterfragt werden. Das ist aber kein Verlust, denn immer wird auf einem bestimmten Niveau etwas nicht weiter hinterfragbar sein. Zur Zeit wird an einem Unterrichtsvorschlag gearbeitet, der an diese Inhalte und auch Methoden (Betrachtung von Lichtwegen zwischen Punkten) in der Sekundarstufe II anknüpft. Dem liegt eine Idee Feynmans [Fey88] zugrunde, deren Eignung für die Schule auch

von Strnad [Str87] und Engelhard [Eng90] diskutiert wurde. Auf dieser Ebene behält das in der Mittelstufe Erarbeitete seine Gültigkeit, und es wird mit einer moderneren Vorstellung von Licht nachträglich plausibel gemacht; natürlich bleiben auch dabei Fragen offen. Während sonst jedoch in der Optik der Eindruck erweckt wird, dass die Modelle wie Strahlen, Welle und Teilchen, auf die sicher nicht vollständig verzichtet werden kann, je nach Fragestellung gewechselt werden, hat der hier vorgestellte Teil, wie auch das Gesamtkonzept, den Anspruch, eine in sich schlüssige Vorstellung von der Optik zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [Dru73] DRUXES, H. *Curriculum für den physikalischen Sachunterricht. – Optik Curriculum unter Verwendung des Fermatschen Prinzips.* 1973
- [Eng90] ENGELHARDT, P.: Quantenphysik in der Schule – undurchsichtige Wege zu unklaren Zielen? In: KUHN, W. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie. – Vorträge auf der GDGP-Tagung in Kassel 1989*, Alsbach, 1990, S. 296 ff.
- [ES91] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Die Schusterkugel. In: WIEBEL, K.H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge auf der GDGP-Tagung in Weingarten 1990* Bd. 10. Alsbach : Leuchtturm, 1991, S. 291–293
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie.* München : Piper, 1988
- [Hof80] HOFMANN, Ch. *Die optische Abbildung.* 1980
- [Hun78] HUND, F. *Geschichte der physikalischen Begriffe I.* 1978
- [LHG85] LEHRKE, M. ; HOFFMANN, L. ; GARDNER, P.L. *Interest in Science an Technology Education, 12th IPN Symposium 1985.* 1985
- [Mac21] MACH, E. *Die Prinzipien der physikalischen Begriffe I.* 1921
- [Ras83] RASCHER, R.: "Moderne Physik" am Beispiel der geometrischen Optik in der Stufe 5/6. In: SCHARMANN, A. (Hrsg.) ; HOFSTAETTER, A. (Hrsg.) ; KUHN, W. (Hrsg.): *Vorträge auf der Frühjahrstagung der DPG FA Didaktik.* Gießen, 1983, S. 244–249
- [Sch] SCHÖN, L. *Vom Sehen zur Optik – Anmerkungen zu einer didaktischen Konzeption*
- [Str87] STRNAD, J.: Der Feynmansche Weg in die Quantenphysik. In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge, Tagungsband der Tagung.* Berlin, 1987, S. 115–121

Arbeitsblatt:

Geometrische Optik mit dem Fermat Prinzip

(Wegen der geringen Größe der Abbildungen dürfen die untersuchten Wege nicht zu nahe beieinander liegen.)

Reflexion

A ⊗

B ⊗



Brechung

A ⊗

B ⊗

Luft

Glas



Abbildung 6.8: Arbeitsblatt

Veröffentlichung 7

Die Fadenkonstruktion gekrümmter Spiegel

Lutz Schön

Universität Osnabrück

(aus: DPG (Hrsg.). *Didaktik der Physik – Vortrag auf der Tagung in Jena 1996.*)

Vorbemerkung

Im Vortrag wurde ein einfaches Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe die Form von gekrümmten Spiegeln bestimmt wird, die vorher festgelegte optische Eigenschaften haben sollen. Im vorliegenden Beitrag wird die Ausgangssituation beschrieben und die physikalische Begründung für das vorgestellte Konstruktionsverfahren erläutert.

7.1 Vom Sehen reeller und virtueller Bilder

Wenn wir unsere Augen öffnen, schauen wir vielleicht aus dem Fenster und sehen über eine Stadt hinweg auf bewaldete Hügel. Dort, wo diese nicht sichtbar sind, werden sie von einem Vordergrund verdeckt, vielleicht von einem Fensterkreuz. In diesem Panorama gibt es keine Stelle, die nicht mit Seehinhalten gefüllt wäre. Kein "blinder Fleck" stört die Sicht, obwohl ein solcher auf der Netzhaut vorhanden ist¹.

Der Seehinhalte korrespondiert mit unserer Erfahrung bei der Bewegung im Raum: Wir können zu vielen sichtbaren Objekten hingehen und ihre Anordnung durch Abschreiten ausmessen; wir berühren die Dinge und spüren beispielsweise deren Oberflächenbeschaffenheit.

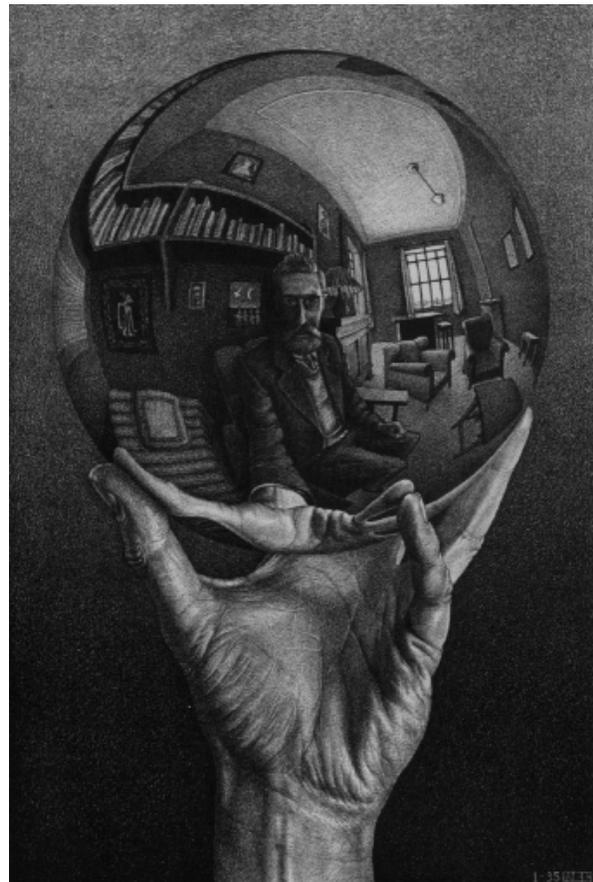
¹Das Bild, das die Augenlinse auf die Netzhaut entwirft, fällt im Bereich des sog. Blinden Fleckes auf ein Netzhautgebiet ohne Sehzellen (Stäbchen oder Zapfen). Eigentlich könnte man erwarten, dass an dieser Stelle Seehinhalte fehlt. Die nachgeschaltete Signalbearbeitung im Gehirn ergänzt diese Lücke.

Ebener Spiegel

Auch der Blick in den ebenen Spiegel zeigt uns eine wohlbekannte Welt, in der wir uns gut auskennen, denn die Anordnung der im Spiegel gesehenen Objekte entspricht der Anordnung der Objekte vor dem Spiegel, lediglich der Drehsinn ist verändert². Bei gut geputzten Spiegeln kann man diese "Spiegelwelt" für die wirkliche halten. Es gibt jedoch einen grundsätzlichen Unterschied: Wir sehen im Spiegel etwas, das wir nicht greifen können, und bei dem Versuch, es dennoch zu tun, stoßen wir uns an der Oberfläche des Spiegels. Nur Alice³ kann in die Spiegelwelt gelangen und sich dort frei bewegen und die Dinge berühren. Für uns gilt dagegen: Die "Spiegelwelt" ist keine "Tastwelt", sie ist nur "Schwelt" [BM89].

Wölbspiegel

Der Rückspiegel im Auto gehört sicherlich zu den am meisten genutzten Spiegeln. Wir haben uns so sehr an ihn gewöhnt, dass wir kaum noch bemerken, dass er ein verändertes Bild der Welt zeigt: Alle Dinge dieser Spiegelwelt sind kleiner als die Dinge vor dem Spiegel, auch die Abstände zwischen ihnen sind geschrumpft. Je stärker die spiegelnde Fläche gekrümmt ist, desto kleiner werden die *Spiegeldinge* und desto mehr der wirklichen Welt ist in dem Spiegel zu sehen. Die verspiegelte Christbaumkugel zeigt (fast) die ganze Welt, und der Beobachter sieht sich im Mittelpunkt (Abbildung 7.1).



Hohlspiegel

Der Hohlspiegel zeigt uns dagegen eine veränderte Welt, die je nach Beobachtungsort anders aussieht: Im Nahbereich sehen wir uns selbst (und andere nahe Dinge) vergrößert, aus der Ferne beobachtet, stehen wir Kopf

Abbildung 7.1: Hand mit spiegelnder Kugel (M.C. Escher, 1935)

²Die vom Betrachter wahrgenommene Links-Rechts-Vertauschung ist die Folge der Veränderung des Drehsinnes in der "Spiegelwelt". Die Umkehrung des Drehsinnes ist wiederum eine Folge der Umkehrung der Richtungen senkrecht zur Spiegeloberfläche.

³Alice war nicht nur im Wunderland, sondern auch "hinter den Spiegeln", so der Titel des etwas weniger bekannten amerikanischen Märchens.

und erscheinen verkleinert. Wenn wir eine brennende Kerze, also einen leuchtenden Gegenstand vor den Hohlspiegel stellen, können wir einen Ort finden, an dem ein kopfstehendes und seitenverkehrtes Bild der Kerze auf einem Schirm aufgefangen werden kann⁴. Genau an dieser Stelle kann ein an geeignetem Ort stehender Beobachter das Bild der kopfstehend-seitenverkehrten Kerze auch ohne Schirm sehen.

In sehr verkürzter Form wurde hier das beschrieben, was die Physiker als *virtuelle* und *reelle Bilder* bezeichnen. Wenn man jedoch nichts von der Konstruktion der Bilder weiß und sich nur auf das Gesehene stützt, wird man den Unterschied zwischen diesen beiden Bildarten kaum bemerken. Der "unbelastete" Beobachter sieht entweder Gegenstände oder deren Bilder "im Spiegel", und beide sind sich oft sehr ähnlich.

7.2 Optische Eigenschaften von Gegenstand und Bild

Wenn Gegenstand und Bild für den Beobachter (fast) nicht zu unterscheiden sind, müssen diese identische optische Eigenschaften haben. Bevor wir eine auf das Fermat-Prinzip gestützte Formulierung dieser gemeinsamen Eigenschaften vorstellen, sollen dem Leser die in der Schulphysik üblichen Bildbedingungen in Erinnerung gebracht werden.

Strahlenoptik

In der Strahlenoptik gehen von jedem Gegenstandspunkt radial verlaufende Strahlen aus. Im *reellen Bildpunkt* schneiden sich die von einem Gegenstandspunkt kommenden Strahlen wieder und verlaufen in einem begrenzten Raumwinkelbereich radial weiter. Kommen divergent-radial verlaufende Strahlen weder von einem Gegenstands-, noch von einem reellen Bildpunkt zum Auge eines Beobachters, so bezeichnet man den Ursprung dieser Strahlen als *virtuellen Bildpunkt*.

Wellenoptik

Von jedem Gegenstand geht (in Raum und Zeit) ein typisches divergierendes Wellenfeld aus, das von Kugelwellen gebildet wird, die von jedem Gegenstandspunkt ausgehen (Huygenssches Prinzip). Ist die Laufrichtung eines solchen Wellenfeldes umgekehrt, konvergiert es also, so entsteht ein reelles Bild am Ort der kleinsten Ausdehnung dieses Wellenfeldes; anschließend divergiert es wieder. Erreicht den Beobachter ein divergierendes Wellenfeld, dessen Ursprung nicht ein Gegenstand ist, so wird jener als virtuelles Bild bezeichnet.

⁴Diese Aussage gilt selbstverständlich nicht nur für leuchtende Objekte, sondern für alle Gegenstände; helle Objekte sind jedoch besser auf einem Schirm sichtbar zu machen.

Fermat-Prinzip

Das Fermat-Prinzip verknüpft Gegenstandspunkt und Beobachter durch die Bedingung, dass das Licht zwischen ihnen den schnellsten bzw. optisch kürzesten Weg nimmt⁵. Wird derselbe Gegenstandspunkt von mehreren Beobachtern aus unterschiedlichen Entfernungen gesehen, so sind die *Lichtwege* unterschiedlich lang. Die Information über den momentanen Zustand des Gegenstandes erreicht solche Beobachter also zu verschiedenen Zeitpunkten⁶. Nur die Beobachter, die gleichweit vom Gegenstandspunkt entfernt sind, erhalten gleichzeitig exakt dieselbe Information über dessen (Raum/Zeit-)Zustand. Solche Beobachter müssen sich i.a. auf einem Kreis um den Gegenstandspunkt befinden⁷: Die genannte Bedingung muss in gleicher Weise für jeden Bildpunkt gelten, für reelle ebenso wie für virtuelle.

Am Beispiel der Schallausbreitung kann der Gehalt dieser Aussage deutlich gemacht werden: Wenn zwei Hörer gleichzeitig eine akustische Information aufnehmen sollen, müssen sie gleich weit von der Schallquelle entfernt sein. Und wenn umgekehrt zwei Lautsprecher einen Hörer beschallen sollen, müssen beide denselben Abstand von ihm haben, damit er eine korrekte, also phasenrichtige Information erhält.

Nicht nur dann, wenn das Fermat-Prinzip bereits im Unterricht behandelt worden ist, sollte es mit Hilfe solcher und ähnlicher Beispiele möglich sein, die genannte Bedingung in der folgenden Formulierung plausibel zu machen:

Sind die Beobachter gleichweit von einem Gegenstand entfernt, befinden sie sich also beispielsweise auf einem Kreis bzw. Kreisabschnitt um den Gegenstand, dann sehen sie ihn stets im selben (räumlichen und zeitlichen) Zustand. Für Bilder gilt das gleiche: Wir sprechen dann von einem Bild, wenn es einen Kreis bzw. Kreisabschnitt gibt, von dem aus das Bild gleichzeitig im selben Zustand gesehen werden kann.

7.3 Die Fadenkonstruktion

Wenn das Licht auf dem Weg vom Objekt zum Beobachter am Spiegel seine Richtung ändert, muss die genannte Bedingung weiterhin gelten: Nur solche Beobachter können das Objekt im selben Zustand wahrnehmen, die gleichweit vom Objekt entfernt sind.

Beim Blick in den Spiegel müssen also zwei Bedingungen zugleich erfüllt sein:

⁵Wir gehen hier davon aus, dass sich zwischen Objekt und Beobachter ein homogenes Medium befindet.

⁶Wegen der sehr großen Lichtgeschwindigkeit wird die unterschiedliche Laufzeit des Lichtes nicht beobachtbar sein. Erst bei astronomischen Entfernungen kann sie eine Rolle spielen.

⁷Streng genommen muss diese Bedingung für jeden einzelnen Punkt des Objektes erfüllt sein.

1. Bildpunkt A' ist Mittelpunkt eines Kreises bzw. Kreisausschnittes mit Radius r , von dem aus alle Beobachter Punkt A' (gleichzeitig) sehen können.
2. Die Länge des Lichtweges von Gegenstandspunkt A über den Spiegel zum Beobachter muss für alle Beobachter auf dem Kreis gleichlang sein.

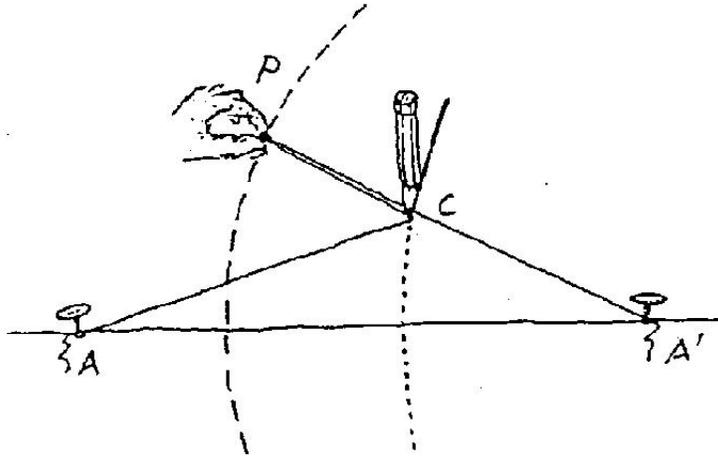


Abbildung 7.2: Konstruktion der Spiegelform

Diese Bedingung lässt sich durch eine Fadenkonstruktion realisieren, mit der zugleich die Form des Spiegels gezeichnet werden kann (Abbildung 7.2): Etwa in der Mitte erhält der Faden einen Knoten, der den Beobachterpunkt P markiert. Das eine Ende des Fadens wird im Gegenstandspunkt A , das andere im Bildpunkt A' befestigt. Das bei A' befestigte Fadenstück wird am Knoten (Punkt P) straff gehalten. Das andere, bei A befestigte Fadenstück wird mit einem Bleistift so gespannt, dass die Bleistiftspitze am anderen Fadenstück anliegt (Punkt C). Unter Beibehaltung dieser Bedingungen werden Knoten und Bleistift bewegt: Der Knoten macht einen Kreis um den Bildpunkt, und der Bleistift zeichnet eine Kurve, deren Form von dem Längenverhältnis der Fadenstücke abhängt.

Wenn die beiden Fadenstücke gleichlang sind, zeichnet der Bleistift eine gerade Linie. Wir erhalten dabei einen ebenen Spiegel, bei welchem Gegenstandspunkt A und Bildpunkt A' genau gleich weit von der spiegelnden Fläche entfernt sind (Abbildung 7.3 (a)). Ist das gegenstandsseitige Fadenstück etwas länger als das bildseitige, zeichnet der Stift eine Hyperbel, es ergibt sich also ein Wölbspiegel (Abbildung 7.3 (b)). Ist umgekehrt das bildseitige Stück länger als das gegenstandsseitige, zeichnet der Stift den offenen Ast einer Hyperbel, es entsteht ein Hohlspiegel (Abbildung 7.3 (c)). Wenn das gegenstandsseitige Fadenstück viel länger ist als das bildseitige, zeichnet der Stift einen Hohlspiegel, der jenseits von Bildpunkt A' liegt. Dieser Hohlspiegel ist keine Hyperbel, sondern ein Ellipsenausschnitt (Abbildung 7.3 (d)).

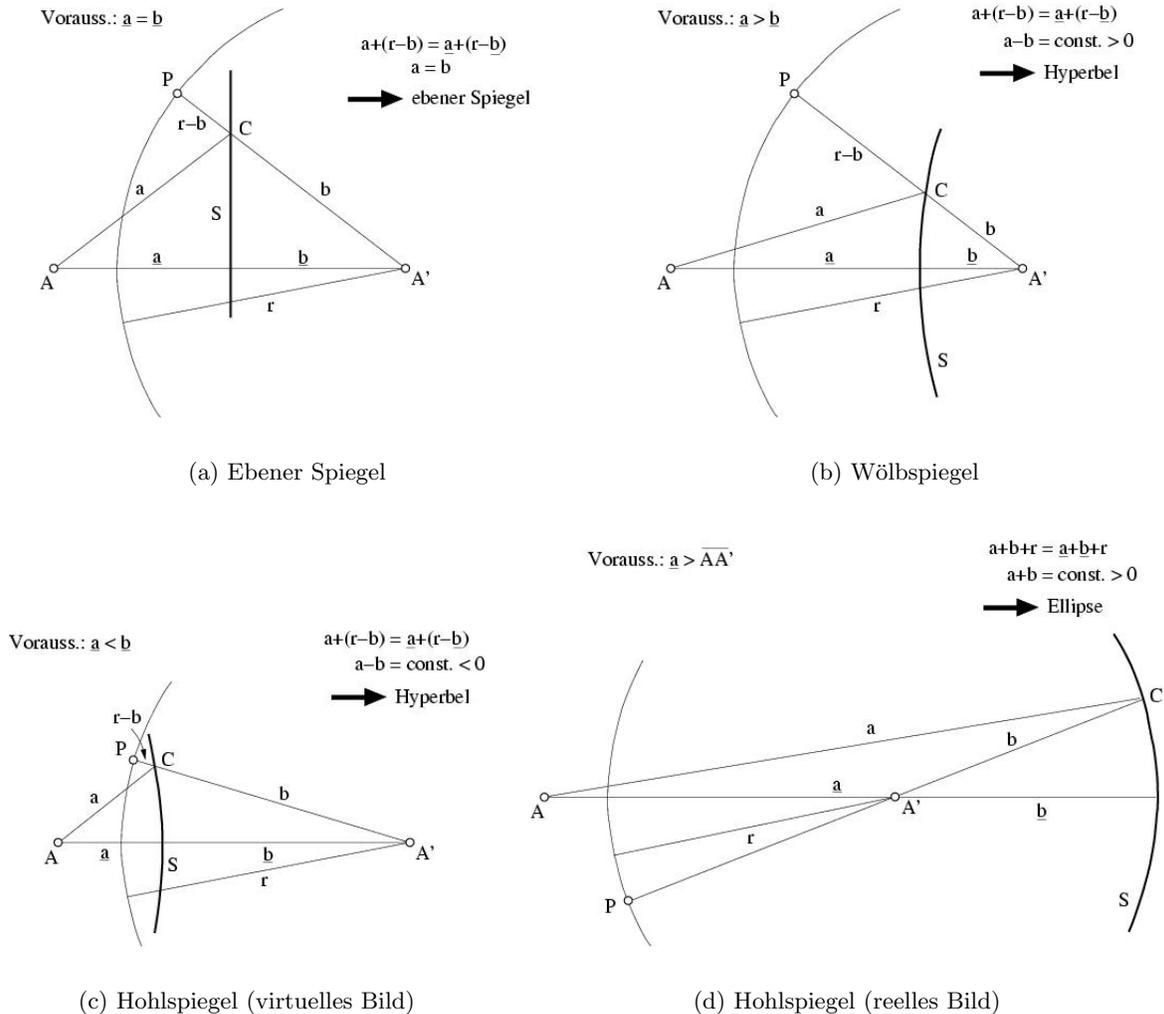


Abbildung 7.3: Konstruktion verschiedener Spiegelformen

7.3.1 Experimentelle Prüfung

Anders als bei den bisher gezeichneten Spiegeln liegt bei dem letzten der Bildpunkt A' vor dem Spiegel, und alle Lichtwege von A über den Spiegel kreuzen sich dort. Mit Hilfe eines biegsamen Kunststoffspiegels kann man diesen Ellipsenspiegel nachformen. Wenn am Punkt A eine brennende Kerze aufgestellt wird, erscheint auf dem (kleinen) Schirm bei Punkt A' eine helle Linie; wäre der Spiegel in zwei Dimensionen, also als Ellipsoid gekrümmt, würde bei A' das Bild der Kerze zu sehen sein⁸ [Erb95].

Das vorgestellte Verfahren ist nicht nur geeignet, bei gegebenem Abstand von Gegenstand und Bild die geeignete Spiegelform zu bestimmen, sondern es kann auch bei gegebenem Spiegel der Bildpunkt zeichnerisch gefunden werden. Wenn der Hyperbel- bzw. Ellipsenspiegel durch

⁸Selbstverständlich lassen sich mit dem Kunststoffspiegel auch die anderen Spiegelformen bilden. Auf diese Weise können die Spiegelbilder betrachtet werden. Es entstehen sicht- und erkennbare Bilder, also gilt die Konstruktion nicht nur für den Punkt A , sondern näherungsweise auch für dessen nähere Umgebung.

einen sphärischen Spiegel, dessen Radius gleich dem Radius des Scheitelkreises ist, ersetzt wird, kann durch eine einfache Konstruktion die Größe des Spiegelbildes und seine Orientierung (kopfstehend oder aufrecht) bestimmt werden. Eine ausführlichere Darstellung der Möglichkeiten dieser Bildkonstruktion ist einer späteren Publikation vorbehalten.

Die Fadenkonstruktion kann durch einen einfachen "Hyperbelzirkel" ausgeführt werden, wie er in Abbildung 7.4 skizziert ist.

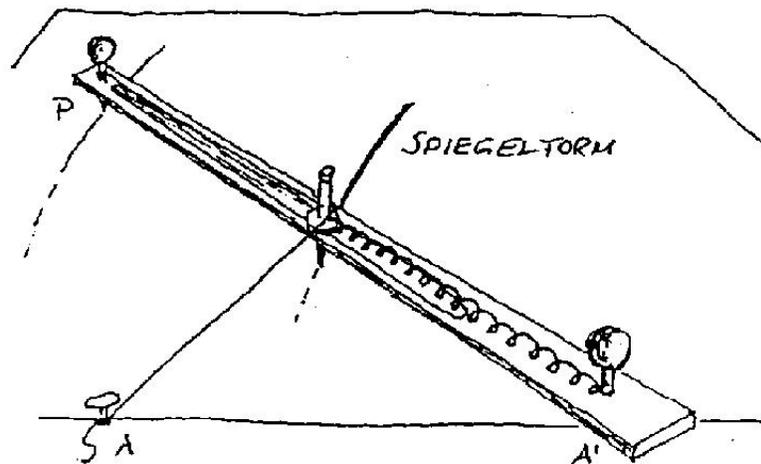


Abbildung 7.4: Ein einfacher "Hyperzirkel"

7.4 Ein Vorschlag für den Physikunterricht?

In diesem Beitrag soll zunächst nur deutlich gemacht werden, dass sich aus der Analyse des Sehens die Bedingungen für die Form von Spiegel ergeben, und zwar ohne das Reflexionsgesetz vorauszusetzen. Ähnliche Betrachtungen, die sich letztlich auf das Fermat-Prinzip stützen, haben [Erb94] und [Rie95] für die Konstruktion von Linsen angestellt. Es ist damit noch nicht der Anspruch verbunden, solche Spiegel- und Bildkonstruktionen in der vorgestellten Weise im Physikunterricht zu behandeln. Hierzu bedarf es gründlicher Klärung der notwendigen Voraussetzungen und der möglichen Konsequenzen für die weitere Vorgehensweise in der Optik.

Literaturverzeichnis

- [BM89] BUCK, P. ; v. MACKENSEN, M.: *Naturphänomene erlebend verstehen*. Köln : Aulis, 1989
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Erb95] ERB, R.: Curved Mirrors. In: *Physics Education* 30 (1995), S. 287–289
- [Rie95] RIEDE, H.: Über die Form von Konvexlinsen. In: *MNU* 48/7 (1995), S. 388–391

Veröffentlichung 8

Das Fermat-Prinzip in der Schule

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: *Zur Didaktik der Physik und Chemie* 20, S. 309-311. Alsbach : Leuchtturm. Posterbeitrag auf der Tagung für Didaktik der Physik und Chemie 1999 in München)

Vorbemerkung

In dem von Erb und Schön unter dem Namen "Lichtwegkonzept" entwickelten Optikcurriculum (vgl. [Sch93, ES96]) ist es vorgesehen, die geometrische Optik in der Sekundarstufe I (Klasse 9/10) auf der Grundlage des Fermat-Prinzips aufzubauen. Zu diesem Teil des Konzepts wurden bisher einige Unterrichtsreihen durchgeführt, die in engem Zusammenhang mit der Entwicklung des Curriculums standen (vgl. [Erb94, SW99]). In einer weiteren unterrichtlichen Erprobung sollten nun einige spezielle Aspekte, die wir als maßgeblich für die Unterrichtskonzeption ansehen, genauer untersucht werden.

8.1 Inhaltlicher Aufbau des Unterrichtskonzepts

Das Curriculum ist so angelegt, dass es durch die Verwendung eines übergeordneten, verbindenden Prinzips, des Fermat-Prinzips, zu einer vertikalen Vernetzung der einzelnen Lerninhalte der geometrischen Optik kommt. Dieses Prinzip soll im Unterricht immer wieder aufgegriffen und dabei schrittweise genauer und umfassender formuliert werden. Bei der Erarbeitung wird ein phänomenologisches Vorgehen in dem Sinne angestrebt, dass die Schüler ausgehend von ihren Beobachtungen Regeln dafür suchen, wie sich das Licht "verhält" und die Vorstellung davon, was das Licht "ist" und woraus es "besteht", möglichst lange offengehalten wird.

8.2 Ziele und Durchführung der Erprobung

Ein wesentliches Ziel der Untersuchung war es, zu prüfen, ob sich die im Unterrichtskonzept beabsichtigte vertikale Vernetzung der Lerninhalte am Ende im erreichten Curriculum als vertikal vernetztes Wissen bei den Schülern nieder schlägt (vgl. [Bun97]). Daraus ergaben sich folgende Untersuchungsfragen:

1. Wie verändert sich die Wissensbasis der Lernenden infolge der Instruktion mit dem kohärent sequenzierten Lehrstoff?
2. Wirkt sich die im Unterrichtskonzept angelegte vertikale Vernetzung der Lerninhalte als "Mitnahmeeffekt" auf das Weiterlernen im nachfolgenden Unterricht aus?

Um das Konzept umsetzen zu können, wurde ein Skript für eine Einheit von 14 Unterrichtsstunden erstellt, das neben Lernzielen und Verlaufsplanungen auch didaktische Hinweise, Experimentieranleitungen und -materialien, Arbeitsblätter und Aufgabenvorschläge sowie eine Computersimulation enthält. Dieses Skript wurde an drei Lehrer weitergegeben, die davon ausgehend im Schuljahr 1998/99 Unterricht in insgesamt vier Lerngruppen der Jahrgangsstufen 9 und 10 durchführten. Die Schüler hatten im allgemeinen Vorkenntnisse zur Optik aus dem lehrplanmäßigen Unterricht in Klasse 7 bzw. Klasse 8. In einer halben Lerngruppe war dieser Optikunterricht jedoch ausgefallen.

8.3 Ergebnisse der Datenerhebung

An der Erprobung des Unterrichts in den vier Lerngruppen nahmen insgesamt $n = 100$ Schüler teil. In einem Vor- und einem Nachtest wurden von allen Schülern concept maps angefertigt sowie ein Fragebogen ausgefüllt. Beim concept mapping erhielten die Schüler 22 vorgegebene Begriffe, die sie frei anordnen und durch Relationen verbinden sollten. Bei der Auswertung wurden die Relationen vorher festgelegten Kategorien zugeordnet und aus den Daten der Einzelnetze Modalnetze berechnet. Gegen Ende der Unterrichtsreihe wurde in allen Lerngruppen eine Klassenarbeit geschrieben, die ebenfalls ausgewertet werden sollte. Zusätzlich wurden mit einzelnen Schülern im Verlauf der Unterrichtsreihe Interviews durchgeführt. Bisher wurde allerdings nur eine geringe Zahl der erhobenen Daten in die Auswertung einbezogen, so dass die vorhandenen Ergebnisse vorläufigen Charakter haben.

Aus der Analyse der vor und nach dem Unterricht angefertigten concept maps, die wir als Repräsentation der Wissensstruktur der Schüler ansehen, erhoffen wir Hinweise auf Veränderungen der Wissensbasis. Abbildung 8.1 auf der nächsten Seite zeigt das Modalnetz einer Lerngruppe bei Beginn der Unterrichtseinheit. Zu diesem Zeitpunkt hat das Wissensnetz fragmentarischen Charakter; es zerfällt in insgesamt 5 Teilnetze, deren größtes 6 Begriffe enthält.

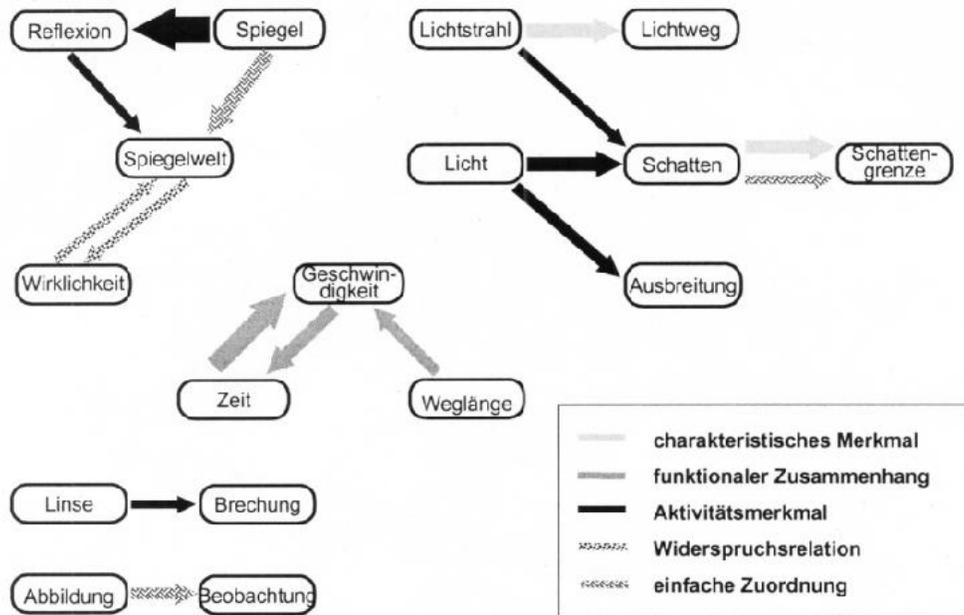


Abbildung 8.1: concept mapping vor dem Unterricht (Modalnetz, $n = 12$)

Im Modalnetz der selben Lerngruppe nach Ende der Unterrichtseinheit (Abbildung 8.2 auf der nächsten Seite) hat sich die Zahl der Teilnetze auf 3 reduziert und die Zahl der Begriffe im größten Teilnetz verdoppelt, so dass wir auf eine stärker zusammenhängende Wissensstruktur schließen können. Eine zentrale Position erhält im Modalnetz nach der Unterrichtsreihe der Begriff "Licht", von dem zahlreiche Verbindungen zu anderen Begriffen ausgehen. Dies deutet darauf hin, dass im Unterricht übergreifendes, konzeptuelles Wissen über das Licht aufgebaut werden konnte. Weitere Veränderungen betreffen die Qualität der Verbindungen. So hat sich die Zahl der einfachen Zuordnungen, die auf unsicheres Wissen hindeuten, von 12 auf 6 reduziert. Die Zahl der charakteristischen Merkmalsrelationen hat sich hingegen von 10 auf 19 erhöht, was möglicherweise auf den phänomenologischen Zugang zurückzuführen ist. Inwieweit solche Veränderungen auf die inhaltliche Struktur des Curriculums zurückzuführen sind und nicht bei jeder Instruktion auftreten, muss durch Vergleichsuntersuchungen gezeigt werden.

Als Maß für die Zentralität wurden die Hoede-Indices der einzelnen Begriffe in den Einzelnetzen berechnet. Die Bedeutungszunahme des Begriffs "Licht" wird auch darin deutlich, dass der zugehörige mittlere Hoede-Index im Laufe der Unterrichtseinheit von 3,5 auf 5,1 zugenommen hat. Der mittlere Hoede-Index des Begriffs "Weglänge" hat ebenfalls zugenommen, und zwar von 0,7 auf 1,8. Dieser Begriff stand als Schlüsselbegriff für die Bestimmung beobachtbarer Lichtwege bei vielen Arbeitsaufträgen sowie bei allen Formulierungen des Fermat-Prinzips

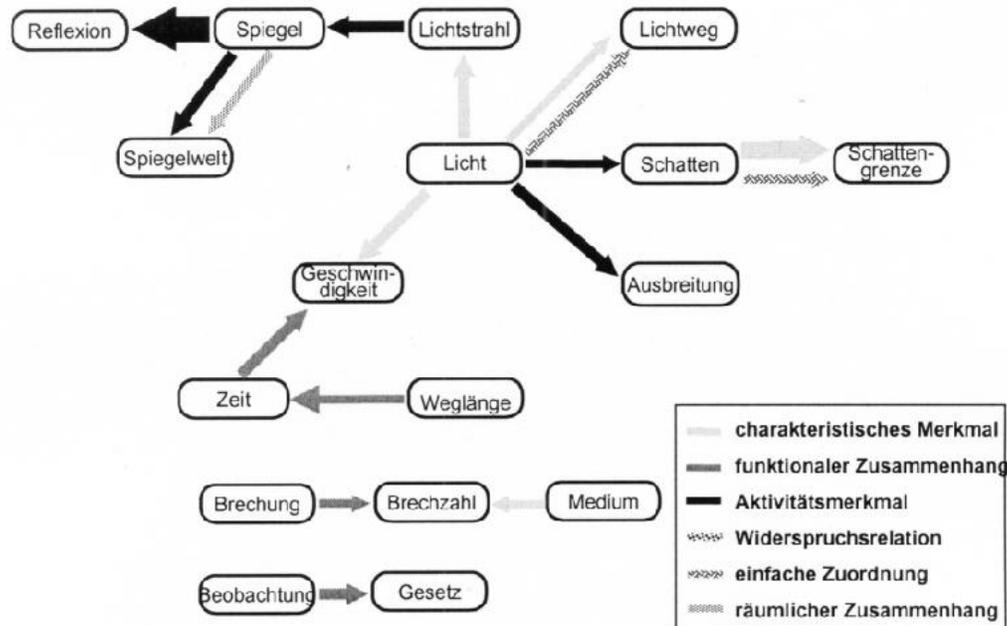


Abbildung 8.2: concept mapping nach dem Unterricht (Modalnetz, $n = 12$)

im Mittelpunkt. Am stärksten abgenommen haben die mittleren Hoede-Indices der Begriffe Lichtstrahl (von 3,0 auf 2,5) und Lichtweg (von 2,2 auf 2,0). Mit dem Lichtstrahlmodell wurde im Unterricht nicht gearbeitet; der Begriff Lichtweg spielt zwar eine zentrale Rolle in unserem Konzept, wurde aber offenbar von vielen Schülern als Synonym zu dem weniger bedeutsamen Begriff Lichtstrahl angesehen.

Durch Analyse der Lösungen von Aufgaben aus einer Klassenarbeit sollte geprüft werden, inwieweit ein "Mitnahmeeffekt" eintritt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Schüler auf früher erworbenes Wissen zugreifen, es zur Lösung neuer Problemstellungen nutzen und modifizieren können. Während nur zwei bzw. sechs von 13 Schülern erfolgreich die wenige Stunden vor der Klassenarbeit eingeführten Inhalte "Abbildungsgleichung" und "Breckkraft einer Linse" anwenden konnten, griffen jeweils neun Schüler erfolgreich auf die einige Wochen früher eingeführten Inhalte "optische und geometrische Weglänge" sowie "optische Abbildung" zurück. Dies erklären wir uns damit, dass in unserem Unterrichtskonzept einmal eingeführte Lerninhalte im nachfolgenden Unterricht konsequent weiterverfolgt und im Unterricht immer wieder aufgegriffen wurden.

8.4 Ausblick

Aus dem derzeitigen Stand der Arbeit ergeben sich folgende Aufgaben für die nächste Zeit: Die erhobenen Daten müssen weiter bearbeitet werden, so dass eine größere Zahl ausgewerteter Fälle zuverlässigere Aussagen ermöglicht. Im laufenden Schuljahr soll in Kontrollgruppen eine

vergleichbare Datenerhebung durchgeführt werden, so dass wir einen Maßstab für die Interpretation der vorhandenen Ergebnisse erhalten. Schließlich ist ebenfalls in diesem Schuljahr eine Nachuntersuchung geplant, in der geprüft werden soll, wie dauerhaft die Veränderungen in der Wissensstruktur der Schüler sind und ob sich der Mitnahmeeffekt auch auf den nachfolgenden Teil des Curriculums erstreckt.

Literaturverzeichnis

- [Bun97] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1997 . – In: Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, H. 60
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES96] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittelstufe. In: *PdN-Physik* 45 (1996), Nr. 8, S. 31–36
- [Sch93] SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992* Bd. 13. Alsbach : Leuchtturm, 1993, S. 271–273
- [SW99] SCHÖN, L. ; WERNER, J.: Vom Licht zum Atom. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 1999

Teil III

Zeiger-Optik

Veröffentlichung 9

Optik in der Oberstufe

Roger Erb

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: *Physik in der Schule* 33 (1995) 2. S. 281-284)

”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.”

(Pierre de Fermat, zitiert nach [Sim90, S. 232])

Die ”bescheidene Hilfe”, deren Veröffentlichung Fermat an dieser Stelle rechtfertigt, ist das nach ihm benannte Prinzip, welches wie folgt formuliert werden kann:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen die kürzeste (allgemein: extremale) Zeit benötigt.

9.1 Unser Bild vom Licht

In der Schule begegnet uns die Optik zu verschiedenen Zeitpunkten, und gerne stellen wir uns das Licht in Abhängigkeit von der Fragestellung als Strahl, Welle oder Teilchen vor – Darstellungen, die in der Physik seit geraumer Zeit verwendet werden.

Fermat hingegen hatte nicht die Absicht, die zu seiner Zeit bekannten optischen Phänomene auf ein anschauliches Modell zurückzuführen. Ihm lag daran, zu zeigen, dass aus seinem Extremalprinzip das Brechungsgesetz abgeleitet werden kann, wenn man annimmt, dass sich

das Licht in optisch dichteren Medien langsamer ausbreitet als in optisch dünneren. Da sein Prinzip auch die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion des Lichtes einschließt, konnten somit alle Phänomene der geometrischen Optik beschrieben werden.

Mit seiner Veröffentlichung löste Fermat 1662 einige Kritik aus. Zum einen widersprach er mit seiner Annahme über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in (optisch) unterschiedlich dichten Medien der Ansicht Descartes. Zwar sollte Fermat, wie wir heute wissen, in dieser Frage Recht behalten, er konnte sich gegen Descartes Autorität aber kaum durchsetzen, und an eine experimentelle Überprüfung war zu der damaligen Zeit, in der noch fraglich war, ob dem Licht überhaupt eine Ausbreitungsgeschwindigkeit zugeordnet werden kann, nicht zu denken. Zum anderen liefert seine Ableitung dasselbe Brechungsgesetz, das schon zuvor bekannt war und das auch Descartes mit seinen falschen Annahmen über die Lichtgeschwindigkeit abgeleitet hatte. Schließlich setzte er sich mit der Formulierung des Prinzips dem Verdacht aus, der Natur den Anspruch des "vernünftigen" Handels zusprechen zu wollen.

Fermat aber betont in seiner Erwiderung einem Kritiker gegenüber, dass es ihm gerade fern gelegen habe, eine Aussage über die "Geheimnisse der Natur" zu machen. (Anders als Maupertius, der bei seiner Suche nach Prinzipien zur Beschreibung mechanischer Vorgänge von einem allgemeinen "Sparsamkeitsprinzip der Natur" ausging [Sza87].)

In der Tat gelingt es ihm durch seine "bescheidene Hilfe geometrischer Art" die Phänomene der geometrischen Optik zusammenfassen zu beschreiben, ohne eine Aussage über ein verborgenes Wirkungsprinzip oder über die Entität des Lichtes selbst zu machen.

Aus diesem Grund erscheint uns das Fermat-Prinzip besonders geeignet, den Optikunterricht in der Mittelstufe zu leiten [Erb92]. Aber auch für die Beschreibung der Phänomene außerhalb der geometrischen Optik kann es uns den Weg weisen.

9.2 Elemente des Optikunterrichts in der Oberstufe

Konkurrierende Lichtmodelle, die über die geometrische Optik hinausgehen, sind insbesondere eine klassische Teilchenvorstellung und eine Wellenvorstellung, die, jede für sich, in der Lage sind, bestimmte Aspekte der Ausbreitung des Lichtes gut zu beschreiben.

Newton sah sich gezwungen, seine Vorstellung von der Ausbreitung des Lichtes durch Korpuskel um weniger anschaulich Elemente (Periodizität) zu erweitern, um auch die Interferenz einbeziehen zu können. Dagegen erfuhr das von Fresnel erweiterte Huygenssche Modell durch die Arbeit Maxwells eine starke Bestätigung. Experimente zur Wechselwirkung zwischen Licht und Materie wiederum brachten aber Ergebnisse, mit denen die Aussagen der elektromagnetischen Lichttheorie nicht ohne weiteres in Einklang zu bringen waren. So bemerkt Planck in einem Vortrag 1919:

"... die Huygenssche Wellentheorie zeigt sich, wenigstens in einem wesentlichen Bestandteil, ernstlich bedroht, und die Ursache davon ist die Entdeckung gewisser neuer Tatsachen... Die einzig mögliche Erklärung für diese eigentümliche Tatsache scheint zu sein, ... dass die Lichtenergie sich nicht völlig gleichmäßig nach allen Richtungen ausbreitet, in endlos fortschreitender Verdünnung, sondern dass sie stets in gewissen bestimmten, nur von der Farbe abhängigen Quanten konzentriert bleibt" [Pla91, S. 75]

Es stellte sich heraus, dass man, um alle Aspekte der Ausbreitung des Lichtes zu berücksichtigen, eine neue, umfassende Theorie – die Quantenelektrodynamik – benötigt.

Im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe hingegen wird die Optik in der Regel nicht als geschlossenes Gebiet behandelt, sondern ihre Inhalte werden zum einen der Wellenlehre und zum anderen der Quantenphysik zugeordnet.

9.3 "Stimmige Denkwege sind lustvoll"[Cio93]

Unser Erkenntnisstreben ist darauf gerichtet, möglichst alle zu einem bestimmten Bereich gehörenden Phänomene schlüssig in einem Konzept zu beschreiben. Es kommt auch dem Schülerinteresse entgegen, wenn ein Gesetz auf eine Reihe von Experimenten angewandt werden kann, der Zusammenhang schließlich einsichtig wird. Feynman formuliert hierzu:

"Aber der wirkliche Triumph der Wissenschaft besteht darin, dass wir einen solchen Gedankenweg finden können, dass das Gesetz einleuchtend erscheint." [FLS73, S. 26-4]

Die Schüler werden das Gesetz dann als sinnvolle Beschreibung akzeptieren, auch wenn es einen höheren Grad an Abstraktion als ein mögliches Modell besitzt – so wie es mit dem Fermat-Prinzip in der Mittelstufe gelingen kann. (Dies bestätigen eigene Unterrichtserfahrungen und auch [Ras83])

Stimmige Denkwege sind eben "lustvoll", und Ciompi präzisiert: – sowohl innerhalb schon gebahnter Bezugssysteme wie zu neuen hin [Cio93].

Unser Bestreben sollte deshalb sein, eine umfassende Beschreibung für die Phänomene außerhalb der geometrischen Optik zu finden, deren behutsame Entwicklung im Unterricht zwar vom Lehrer gelenkt werden muss, von den Schülern aber im Detail nachvollzogen werden kann. Dazu ist es erforderlich, zum einen möglichst unvoreingenommen von den Phänomenen selbst auszugehen und zum anderen von einer Erklärung nicht mehr zu erwarten als die Beschreibung einer Vielzahl von Einzelaspekten – eine Absicht, die an dieser Stelle zwar besonders bedeutsam wird, aber durchaus nicht neu ist. So ist auch beispielsweise

”Das Newtonsche Gravitationsgesetz... nur eine Beschreibung, zwar keine Beschreibung eines Individualfalles, aber die Beschreibung unzähliger Tatsachen in den Elementen.” [Mac10, S. 426]

Eine Möglichkeit zur Realisierung dieses Vorhabens könnte darin bestehen dass wir uns an der Quantenelektrodynamik orientieren. Es sind Versuch unternommen worden, Elemente dieser Theorie dem Physikunterricht zugänglich zu machen [Kuh85].

Wir wollen hingegen nur einige der mit ihr gewonnenen Erkenntnisse in dem weiter unten ausgeführten Unterrichtsvorschlag nutzen und greifen dabei auf Ideen zurück, die Feynman in seiner populärwissenschaftlichen Darstellung ”*QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*” [Fey88] ausgeführt hat. (Auch [Bad94] weist neben anderen auf die Möglichkeit hin, die Feynmanssche Idee im Physikunterricht zu verwenden.)

9.4 Der Zeigerformalismus

Bei der Behandlung der geometrischen Optik mit dem Fermat-Prinzip kann der sonst übliche Begriff des ”Lichtstrahls” durch den Begriff ”Lichtweg” ersetzt werden. Dessen Verwendung weist deutlicher darauf hin, dass lediglich eine *Eigenschaft* des Lichtes betrachtet werden soll.

Feynman betont in seiner Darstellung deutlich die Teilcheneigenschaft des Lichtes. Wir aber wollen die *Lichtwege* als wesentliches Beschreibungsmerkmal beibehalten. Während in der geometrischen Optik allerdings der tatsächliche von ”denkbaren” Lichtwegen unterschieden werden müsste, bekommt der Begriff außerhalb der geometrischen Optik zum Teil eine andere Funktion. (Einen ähnlichen Begriff, nämlich den der ”Blickrichtung”, stellen wir in dem Teil des Optikunterrichtes, der nach unseren Vorstellungen noch vor der geometrischen Optik unterrichtet wird, in den Vordergrund [Sch94].)

Die neue Beschreibung muss neben den Phänomenen der geometrischen Optik folgende mit einbeziehen:

a) Die Intensität des auf zwei oder mehr Lichtwegen ankommenden Lichtes darf nicht einfach addiert werden, sondern es muss das Interferenzprinzip berücksichtigt werden.

Im Wellenmodell ist die Intensität des Lichtes proportional zum Quadrat der Amplitude der elektrischen Feldstärke E . Sind zwei Wellen zu addieren, so gilt (skalar):

$$I = I_1 + I_2 + E_{01}E_{02} \cos \delta,$$

wobei δ der Phasenunterschied der beiden Wellen ist.

In komplexer Schreibweise kann

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

als Realteil von

$$E = E_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

aufgefasst werden. Da aufgrund der hohen Frequenzen der zeitliche Verlauf nicht von Bedeutung ist, kann statt $e^{i(kx - \omega t)}$ vereinfacht $e^{i\varphi}$ geschrieben werden, wobei φ der Phasenwinkel der Welle ist, der von der Länge des Lichtwegs und der Wellenlänge abhängt.

Sind zwei Wellen zu addieren, so ergibt sich nun für die Feldstärke

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} e^{i\varphi_1} + E_{02} e^{i\varphi_2} = E_0 e^{i\varphi}.$$

Weiter ist allgemein

$$E^2 = (E_0 e^{i\varphi})(E_0 e^{i\varphi})^*$$

und somit für zwei Wellen

$$\begin{aligned} E^2 &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01} E_{02} \left(e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right) \\ E^2 &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01} E_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned} \quad (9.1)$$

Die Intensität wird wie oben

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

und für

$$I_1 = I_2 \quad (9.2)$$

$$I = 4I_1 \cos^2 [(\varphi_1 - \varphi_2) / 2],$$

was eine Interferenzfigur, die durch zwei Wellen entsteht (zum Beispiel hinter einem Doppelspalt mit infinitesimalen Spaltbreiten), richtig beschreibt.

Für den Unterricht ist hierbei bedeutsam, dass die Summe (9.1) grafisch wie die Addition zweier Vektoren gebildet werden kann, ohne dass Kenntnisse über die Verwendung komplexer Amplituden erforderlich sind.

Die Darstellung wird außerdem unabhängig von dem hier zunächst verwendeten Wellenmodell, wenn man eine Zeigerdarstellung wählt. Hierbei wird für jeden Lichtweg (den beiden Wellen beim Doppelspalt entsprechen also zwei Lichtwege) ein Zeiger gezeichnet, die bei gleicher Frequenz des Lichtes mit gleicher Geschwindigkeit rotieren. Erneut wird vom zeitlichen Verlauf abgesehen, da lediglich E_0 und nicht $E(t)$ von Bedeutung ist. Die Zeiger werden dann phasenrichtig addiert, wobei aber nur die Phasendifferenz eine Rolle spielt. Das Quadrat des resultierenden Zeigers wird schließlich als Intensität interpretiert. Alle Zeiger haben dabei die gleiche Länge – alle Lichtwege tragen mit gleichem Betrag bei. Diese Vereinfachung ist in der Regel zulässig und wurde auch schon bei Formel 9.2 verwendet.

Mit der Zeigerdarstellung wird also die Interferenz beschrieben, ohne dass trigonometrische Funktionen erforderlich sind, die zwangsläufig an die Wellenvorstellung erinnern.

Auch für Beugungsprobleme ist diese Technik verwendbar. Im Wellenbild müssen zur Lösung von Beugungsproblemen in jedem Punkt auf dem Schirm die ankommenden Wellen vieler Sekundärwellenerreger (zum Beispiel in einem Spalt) addiert werden. Hierbei sollen die Abstände zwischen diesen klein sein und für eine genaue Betrachtung gegen 0 gehen. Verwendet man dagegen Lichtwege zur Beschreibung, muss analog gefordert werden, dass die Zeiger vieler Lichtwege (durch den Spalt) in jedem Schirmpunkt addiert werden. Genaugenommen müssten wieder unendlich viele (und auch nicht nur gerade) Lichtwege herangezogen werden. Diese Argumentation ist die Grundlage für Feynmans "QED" und wurde von ihm schon 1948 und ausführlicher 1965 dargestellt [Fey48, FH65].

b) Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie (am Ende eines Lichtweges) ist quantenhaft

Das Bestimmen der Intensität muss deshalb immer mit dem Registrieren sogenannter Photonen verbunden sein.

Werden N Photonen in einem Zähler mit der Eintrittsfläche ΔA gezählt, so ist

$$I = \frac{hfN}{t\Delta A}.$$

Ist N die Zahl der bei I insgesamt registrierten Photonen, so ergibt sich

$$\frac{I}{I_0} = \frac{N}{N_0} \frac{A_0}{\Delta A}.$$

Die Wahrscheinlichkeit $P = N/N_0$, ein Photon im Zähler zu registrieren, ist folglich

$$P \sim I\Delta A.$$

Somit ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsdichte und für *einen* realen Zähler auch die Wahrscheinlichkeit als proportional zur Intensität.

9.5 Bedeutung des Zeigerformalismus für den Optikunterricht

Die "fortschrittlichsten und ausgefeilten" Theorien gingen dagegen von einem rein phänomenologischen Gesichtspunkt aus: Wissenschaftliche Theorien sollten nur die Beziehungen beobachtbarer Größen behandeln, und ein Streben nach der Denkökonomie sollte den Versuch ersetzen, die Phänomene durch unbeobachtbare Größen zu erklären... (S. Brush zitiert nach [Hol84])

Diese Auffassung zur Entstehung physikalischer Theorien, die um die letzte Jahrhundertwende diskutiert wurde, kann sicher nicht für alle Gebiete der Wissenschaft aufrechterhalten werden.

Aber könnte nicht gerade dem Optikunterricht der Oberstufe eine solche Geisteshaltung förderlich sein? Wenn wir im Physikunterricht eine Stelle berühren, an der auch die Wissenschaft lernen musste manche Ansprüche zurückzustellen, ist es vielleicht der richtige Moment, sich auf die Grenzen physikalischer Aussagemöglichkeiten zu besinnen. Wir können es vermeiden, den Schülern auf im Unterricht entstehende Fragen Teillösungen in Form von Rückgriffen auf bekannte Modelle anzubieten, wenn wir ihnen eine Beschreibung vorstellen, deren gesamte Tragweite sie überschauen können, die die gezeigten Phänomene umfasst und bei deren Erarbeitung ihre eigenen Grenzen unmittelbar deutlich werden. Der Zeigerformalismus ist eine solche Beschreibung, und er eröffnet darüberhinaus die Möglichkeit, eine Reihe von weiteren Phänomenen einzubinden (auch solche, die bislang im Physikunterricht nicht behandelt werden konnten). Zudem werden, wie es von einer übergreifenden Beschreibung erwartet werden kann, einige Sachverhalte vorausgesagt, die experimentell überprüft werden können.

Die Ausführung der Zeigeraddition (vgl. nächsten Abschnitt) selbst geschieht im Unterricht wegen der im allgemeinen großen Zahl von Zeigern mit einem Computerprogramm¹, wird also nicht von den Schülern selbst durchgeführt. Alle Schritte, die dazu nötig sind, sind aber elementar und können von den Schülern nachvollzogen werden.

Als ein Problem bleibt bislang bestehen, dass das Phänomen der Polarisation noch nicht in den Zeigerformalismus eingebunden ist. Im Anschluss an die hier vorgestellte Unterrichtseinheit kann aber die Deutung der schon behandelten optischen Phänomene im Wellenbild angesprochen werden (wobei *dann* der Modellcharakter deutlich wird) und bei dieser Gelegenheit die Polarisation gezeigt werden. Es wird an dieser Stelle auch die Entsprechung der Wellenlänge und der in unserem Konzept verwendeten "Basislänge" deutlich.

9.6 Ein Unterrichtsvorschlag

Zu Beginn werden die drei Phänomene *partielle Reflexion*, *quantenhafte Wechselwirkung* und *Interferenz* vorgestellt. Hierzu gibt es eine Reihe von Experimenten, von denen hier nur jeweils eines kurz geschildert wird. (Eine ausführlichere Darstellung ist in [Erb94] zu finden.)

a) Partielle Reflexion

V: Mit dem Licht einer Kerze wird der Raum durch eine Glasscheibe hindurch beleuchtet. Ein Teil des Lichtes wird dabei von der Scheibe reflektiert.

Ergebnis: *Licht wird an einer Glasscheibe partiell reflektiert. Ein Lichtweg kann sich in zwei oder mehrere aufspalten.*

¹Dieses Programm kann gegen Einsendung eines frankierten Rückumschlages vom Autor bezogen werden. Der Quelltext ist zu finden in [Erb94].

b) Quantenhafte Wechselwirkung

Letztlich sind alle Aussagen über Licht nur möglich, weil es in Wechselwirkung mit dem Auge, einem Fotonegativ, einem Zählrohr oder ähnlichem tritt. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich dabei, dass Lichtenergie nur portionsweise aufgenommen wird.

V: Experimente, die die "körnige Struktur der Wechselwirkung zeigen, sind nicht einfach zu realisieren. Man bekommt einen Eindruck beim Betrachten einer belichteten Fotoschicht unter dem Mikroskop.

Ergebnis: *Wird Licht am Ende eines Lichtwegs registriert, so geschieht dies immer portionsweise. Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ist quantenhaft.*

Es ergibt sich nun die Frage, wie die partielle Reflexion mit der quantenhaften Wechselwirkung in Einklang gebracht werden kann.

Tatsächlich gibt es keine Möglichkeit, das Registrieren *eines* durchgelassenen und *eines* reflektierten Photons vorherzusagen, da die Photonen im Glas nicht unterschiedlich behandelt werden. Es kann lediglich die Aussage gemacht werden, dass bei senkrechtem Einfall 4% aller Photonen reflektiert werden. Die Wahrscheinlichkeit für das einzelne Photon, reflektiert zu werden, ist dementsprechend 0,04.

Ergebnis: *Bei Experimenten, in denen ein Lichtweg aufgeteilt wird, kann das Registrieren eines Photons nur in Form einer Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden.*

c) Interferenz

V: Betrachtet man eine in einem Drahtrahmen aufgespannte Seifenhaut (an der das Licht ebenfalls partiell reflektiert wird), so findet man die Farben der Seifenblasen wieder. Beim Beleuchten mit einfarbigem Licht zeigt sich, dass die Farben dieser Haut auf Hell-Dunkel-Streifen zurückführbar sind. Auch dickere Schichten wie Objektträger oder zwei teilverspiegelte Glasplatten (eine Art Fabry-Perot-Interferometer in Reflexion) erzeugen solche Muster aus hellen und dunklen Stellen auf einem Schirm, der eigentlich gleichmäßig vom reflektierten Licht beleuchtet werden müsste.

Das Charakteristische dieser Aufbauten ist, dass durch die Verwendung von zwei reflektierenden Grenzschichten zwei Lichtwege zwischen Lichtquelle und einem Punkt auf dem Schirm zur Verfügung stehen.

Dabei spielt offensichtlich die Längendifferenz der beiden Lichtwege die entscheidende Rolle, denn das Interferenzmuster wechselt mit zunehmender Dicke der keilförmigen Seifenschicht von Dunkel nach Hell wieder nach Dunkel usw. Die periodische Struktur lässt darauf schließen, dass bestimmte Wegdifferenzen (in der Größenordnung der Dicke der Seifenhaut) gleiche Phänomene bewirken.

Ergebnis: *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.*

d) Zeigerformalismus

Um alle Phänomene gemeinsam zu beschreiben, fassen wir die Befunde zusammen und verwenden eine Technik, die der Addition von Vektoren entspricht.

Ergebnis: Zeigerformalismus

- 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.
- (Die Notwendigkeit des Quadrieren wird erst im Nachhinein begründet werden.)

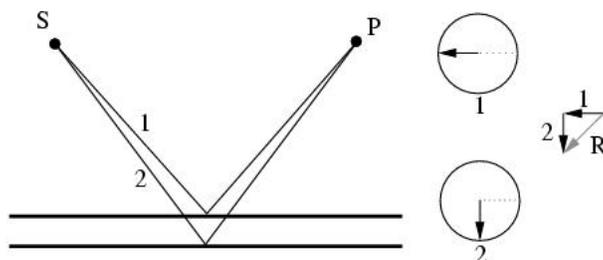


Abbildung 9.1: Schematische Darstellung Addition zweier Zeiger

In Abbildung 9.1 ist die Addition der Zeiger zweier Lichtwege von einer Lichtquelle im Punkt S über zwei Glasplatten zu einem Punkt P schematisch dargestellt.

e) Bestimmung der Basislänge

Die Basislänge λ des Lichtes macht sich uns in seiner Farbe bemerkbar.

V: Um den Zusammenhang zwischen Basislänge und Farbe des Lichtes zu verdeutlichen, beleuchten wir die vertikal eingespannte Seifenlamelle nacheinander mit Licht verschiedener Farbe und beobachten den Abstand der in Reflexion sichtbaren Interferenzstreifen. Die Basislänge monochromatischen Lichtes kann z.B. mit einem Michelson-Interferometer ermittelt werden.

V: Beobachtet wird das ringförmige Interferenzmuster auf einem Schirm, dass sich bei Verwendung eines aufgeweiteten Laserlichtbündels ergibt. Beim Verstellen des beweglichen Spiegels läuft das Interferenzmuster (am besten sichtbar im Zentrum) gerade einmal von Hell nach Dunkel und wieder nach Hell, wenn die Änderung des Lichtweges – also das Doppelte der Strecke, um die der Spiegel bewegt wurde – gleich λ ist.

f) Mehrfachreflexion und Phasensprung

Bei der Berechnung des Ergebnisses, das durch die Reflexion an Vorder- und Rückseite einer Glasplatte zustandekommt, wird deutlich, dass das *Quadrat* des resultierenden Zeigers ein Maß für die Intensität ist. Außerdem wird für die Reflexion am optisch dichteren Medium ein Phasensprung eingeführt, der unter anderem auch erklärt, wieso die vertikale Seifenlamelle im reflektierten Licht im oberen Bereich nach kurzer Zeit dunkel und damit völlig durchsichtig wird.

Die Überlegungen zur Addition der Lichtwege an Vorder- und Rückseite einer Glasplatte beschreibt Feynman [Fey88] ebenso ausführlich, wie die sich daraus ergebende Konsequenzen für die Beugung. Die uns wichtigen Elemente sind in unserem Lehrgang berücksichtigt worden [Erb94].

g) Ein Beispiel: Beugung am Spiegel

Die ganze Tragweite wird deutlich, wenn man neben den in der Schule üblichen Phänomenen auch solche behandelt, die überraschende, bislang nicht berücksichtbare Ergebnisse hervorrufen [Erb95]. An einem Beispiel, das auch Feynman verwendet und das von uns im Experiment nachvollzogen wurde, soll dies deutlich werden.

Es soll die Intensität des von einer punktförmigen Lichtquelle S über einen Spiegel kommenden Lichtes in einem Punkt P bestimmt werden.

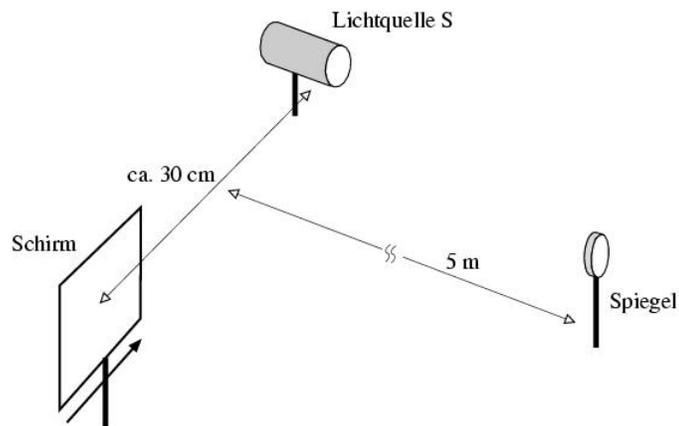


Abbildung 9.2: Versuchsaufbau zur Reflexion

V: Hierzu wird das Licht eines Lasers mit einer kurzbrennweitigen Linse ($f \approx 10$ mm) aufgeweitet. Das Lichtbündel wird so auf einen Oberflächenspiegel in einer Entfernung von 5 m gerichtet, dass ein sich neben dem Laser befindender Schirm beleuchtet wird (Abbildung 9.2).

Da wir nicht mehr auf der Basis der geometrischen Optik argumentieren, genügt es für die Berechnung nicht, wie bislang den geometrisch zu erwartenden Lichtweg heranzuziehen, sondern es müssten alle, d.h. unendlich viele Wege (über verschiedene Punkte des Spiegels) berücksichtigt werden. In der Praxis reicht es aus, wenn man eine Auswahl aller Lichtwege heranzieht.

Die soll zunächst mit Hilfe einer schematischen Darstellung veranschaulicht werden. Die Zeiger von 33 ausgewählten Lichtwegen addieren sich zu einer Spirale, wie in Abbildung 9.3 deutlich wird. Man erkennt, dass nicht nur der geometrische, kürzeste Lichtweg zum Ergebnis

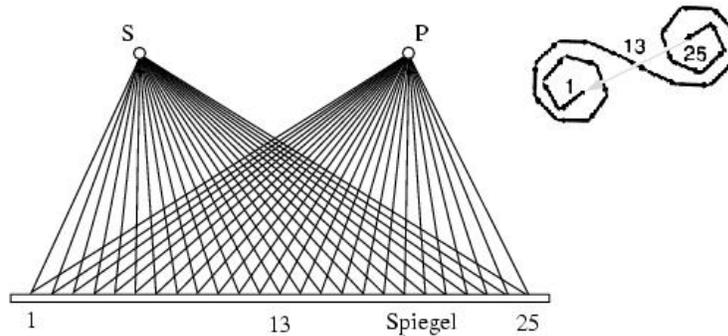


Abbildung 9.3: Schematische Darstellung der Zeigeraddition

(heller Zeiger) beiträgt, sondern auch benachbarte einen konstruktiven Beitrag liefern, weil ihre Zeigerstellungen kaum voneinander abweichen.

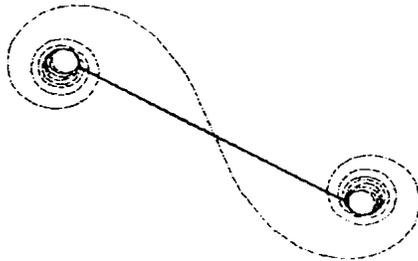


Abbildung 9.4: Zeigeraddition

Weiter entferntliegende Lichtwege interferieren aber destruktiv, tragen also nicht bei: Hiermit wird das aus der geometrischen Optik zu erwartende Ergebnis und damit das Fermat-Prinzip bestätigt. Auch die Vereinfachung, die darin besteht, dass wir nur geradlinige Wege verwendet haben, lässt sich auf ähnlich Weise rechtfertigen. Man sieht weiter, dass eine Erhöhung der Zahl der Lichtwege keine grundsätzlich Änderung hervorrufen würde.

Aber es ist auch zu erkennen, dass eine noch höhere Intensität in P erwarten werden dürfte, wenn die Lichtwege, deren Zeigerstellung um mehr als $\pm 90^\circ$ von der Richtung des resultierenden Zeigers abweicht, nicht einbezogen würden. Dazu dürfte der Spiegel an den Stellen, über die die betreffenden Lichtwege gehen, nicht reflektieren. Dies könnte gelingen, wenn wir ihn durch ein Gitter bedecken.

In einem entsprechenden Experiment wollen wir hierzu allerdings nicht den gesamten Spiegel, sondern nur eine 1 cm breiten Bereich betrachten. Verwenden wir ein Strichgitter, so bleibt die Berechnung auf eine Dimension beschränkt. Wir erwarten dann statt eines hellen Punktes eine helle Linie, deren Höhe von der des Strichgitters abhängt.

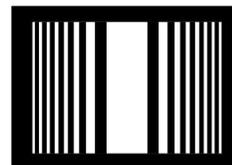
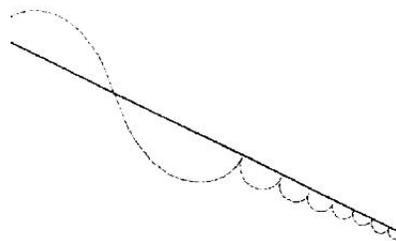


Abbildung 9.5: Das verwendete Gitter

Wir berechnen die sich für unseren experimentellen Aufbau aus 500 Zeigern ergebende Spirale mit dem Computer (Abbildung 9.4 auf der vorherigen Seite).



Blendet man die Lichtwege, die destruktiv interferieren, aus, ergibt die Addition der Zeiger das in Abbildung 9.6 gezeigte Ergebnis (Ausschnitt: Bei gleichem Maßstab wie Abbildung 9.4 auf der vorherigen Seite). Wir

Abbildung 9.6: Zeigeraddition bei Verwendung des Gitters

können jetzt das erforderliche Gitter vergrößert zeichnen, fotografieren und im richtigen Maßstab auf Folie kopieren (Abbildung 9.5 auf der vorherigen Seite).

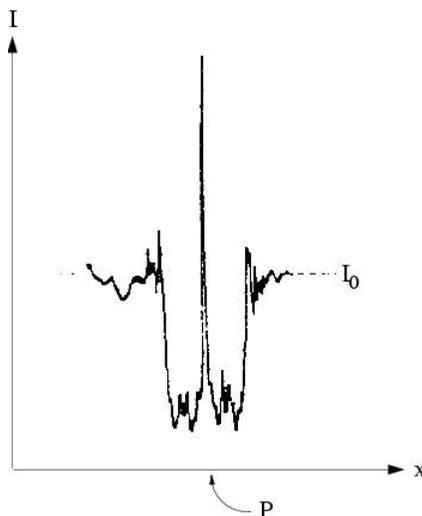


Abbildung 9.7: Gemessene Intensität auf dem Schirm

Bringt man das Gitter direkt vor den Spiegel, so erscheint auf dem Schirm wie vorausgesagt deutlich sichtbar eine helle Linie. Die Intensität auf dem Schirm kann mit einer Photodiode vermessen werden. Das Messergebnis zeigt die deutliche Erhöhung der Intensität gegenüber der Intensität des ohne Gitter beleuchteten Schirms I_0 (Abbildung 9.7).

Das Beispiel macht deutlich, dass die Anwendung des Zeigerformalismus zu vernünftigen Ergebnissen führt. In diesem Fall zudem zu einem für die Schüler überraschenden: Obwohl ein Teil der Spiegelfläche abgedeckt wird, ergibt sich eine *größere* Intensität in einem bestimmten Bereich.

Der Aufbau des benötigten Gitters ist wegen seiner Ausmaße der Anschauung direkt zugänglich – das Gitter kann auch von den Schülern selbst hergestellt werden.

9.7 Abschliessende Bemerkungen

Der vorstehende Unterrichtsvorschlag kann natürlich nicht beanspruchen, unabhängig von allen schulischen Gegebenheiten einen größeren Lernerfolg zu bewirken. Er ist aber so angelegt, dass in jedem Fall die sensiblen Punkte der Optik auf Oberstufenniveau und damit zugleich die Anfänge der Quantenphysik hervorgehoben werden. Gemeinsam mit der Möglichkeit, eine in sich schlüssige Darstellung zu erhalten, und der Chance zur Bearbeitung elementarer Beugungsprobleme resultiert daraus die Hoffnung auf die Entwicklung eines zeitgemäßen Bildes der Optik.

Die Einordnung in den Unterricht erfolgt idealerweise *vor* dem Unterricht über Quantenphysik, ohne dass die Schüler zuvor das Wellenmodell des Lichtes, dafür aber schon in der Mittelstufe die geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip kennengelernt haben. Aber auch die zusätzliche Einbindung in den "normalen" Unterricht kann erfolgversprechend sein!

Literaturverzeichnis

- [Bad94] BADER, F.: Optik und Quantenphysik nach Feynmans QED. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 7/8, S. 250–256
- [Cio93] CIOMPI, L.: Die Hypothese der Affektlogik. In: *Spektrum der Wissenschaft*, 1993, S. 76–87
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Erb95] ERB, R.: Curved Mirrors. In: *Physics Education* 30 (1995), S. 287–289
- [Fey48] FEYNMAN, R. P.: Space-Time-Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics. In: *Rev. Mod. Phys.* 20 (1948), S. 367–387
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [FH65] FEYNMAN, R. P. ; HIPPS, A.R.: *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw-Hill, 1965
- [FLS73] FEYNMAN, R. P. ; LEIGHTON, R.B. ; SANDS, M.: *Vorlesungen über Physik Band I Teil 2*. München : Oldenbourg, 1973. – Hauptsächlich Mechanik, Strahlung und Wärme

- [Hol84] HOLTON, G.: *Themata zur Ideengeschichte der Physik*. Braunschweig : Vieweg, 1984
- [Kuh85] KUHN, W.: Methodisches Konzept zur Elementarisierung der Quantenelektrodynamik. In: *PdN-Ph* 34 (1985), Nr. 7, S. 18–25
- [Mac10] MACH, E. *Populärwissenschaftliche Vorlesungen*. 1910
- [Pla91] PLANCK, M.: *Vom Wesen der Wissensfreiheit*. Frankfurt : Fischer, 1991
- [Ras83] RASCHER, R.: "Moderne Physik" am Beispiel der geometrischen Optik in der Stufe 5/6. In: SCHARMANN, A. (Hrsg.) ; HOFSTAETTER, A. (Hrsg.) ; KUHN, W. (Hrsg.): *Vorträge auf der Frühjahrstagung der DPG FA Didaktik*. Gießen, 1983, S. 244–249
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Sim90] SIMONY, K.: *Kulturgeschichte der Physik*. Frankfurt/M : Harri Deutsch, 1990
- [Sza87] SZABO, I.: *Geschichte der mechanischen Prinzipien*. Basel, Boston, Stuttgart : Birkhäuser, 1987

Veröffentlichung 10

Berechnung von Beugungsbildern

Roger Erb

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: *MNU* 48 (5), S. 281-284)

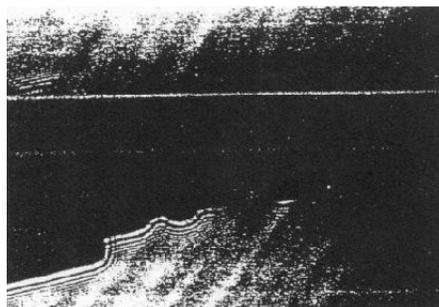
Vorbemerkung

Der Behandlung der Optik im Oberstufenunterricht wäre es dienlich, wenn nicht nur Fraunhofersche sondern auch Fresnelsche Beugungsbilder betrachtet werden könnten. Mit Hilfe von Lichtwegen und eines Zeigerformalismus können diese Phänomene auf elementare Weise auch Schülern zugänglich gemacht werden.

10.1 Einleitung

Eines der Phänomene, das grundlegende Hinweise auf die Natur der Lichtausbreitung gibt, ist die Beugung. Häufig betrachtet man in der Schule lediglich Fälle Fraunhoferscher Beugung, bei der schmale Spalte verwendet werden. Die eigentliche Bedeutung des Beugungsphänomens wird aber erst deutlich, wenn man sich nicht auf diese spezielle experimentelle Situation beschränkt.

Tatsächlich erhält man beim Beleuchten eines beliebigen Gegenstandes mit dem aufge-



weiteten Lichtbündel eines Lasers auf einem einige Zentimeter hinter dem Gegenstand ste-

Abbildung 10.1: Beugung an einem Schlüssel

henden Schirm ein Schattenbild, das von hellen und dunklen Gebieten umgeben ist. Man kann auch direkt die Filmebene einer Kamera (ohne Objektiv) belichten, wie es für Abbildung 10.1 auf der vorherigen Seite geschehen ist. Solche Fresnelschen Beugungsbilder repräsentieren die Grundform der Beugung, da im Experiment lediglich eine Lichtquelle und der Gegenstand, an dem das Licht gebeugt wird, benötigt werden; als ein Spezialfall ergibt sich auch die Fraunhofersche Beugung.

10.2 Zeigerformalismus

Die Berechnung Fresnelscher Beugungsbilder ist im Vergleich zur Beschreibung der Fraunhoferschen Beugung viel schwieriger. Der Formalismus, der hierzu in der Wellenoptik benötigt wird, ist nicht leicht zugänglich und selbst in allgemeinen Hochschullehrbüchern meist nicht zu finden [Hec89]. Die Berechnung der Beugungsmuster wird aber möglich, wenn wir sie auf eine begrenzte Zahl von Lichtwegen, deren Länge und die daraus resultierenden Phasenbeziehungen beschränken.

Wir verwenden hierbei mit dem Lichtweg einen Begriff, dessen Einführung uns schon in der geometrischen Optik der Mittelstufe sinnvoll erscheint [Sch94, Erb92]. Dort verleiht er – im Gegensatz zum Begriff des Lichtstrahls – der Tatsache Ausdruck, dass die Frage nach der Ausbreitung des Lichtes im Vordergrund steht; hier sollen die Schüler den gleichen Begriff wiederverwenden (was darauf hindeutet, dass das in der Mittelstufe erlernte seine Bedeutung behält). Dabei können sie erkennen, dass es weiterhin das Ziel des Physikunterrichts ist, Phänomene in einer in sich schlüssigen Darstellung zu beschreiben, und nicht etwa die Antwort darauf zu suchen, was Licht *ist*. In der Mittelstufe bedienen wir uns dazu der Fermat-Prinzips, in der Oberstufe darauf aufbauend eines von Feynman vorgeschlagenen Formalismus, mit dem man in der Lage ist, Wellen- und Quantenaspekte der Lichtausbreitung gleichermaßen zu berücksichtigen [Fey88].

Um demnach die Intensität des von einer (punktförmigen) Lichtquelle kommenden Lichtes in einem Punkt (z.B. auf einem Schirm, im Auge, in einer Fozelle oder allgemein in einem Empfänger) zu bestimmen, soll der Beitrag *aller* Lichtwege – das sind, wie weiter unten deutlich wird, nicht nur solchen, die nach der geometrischen Optik zulässig sind – in diesem Punkt berücksichtigt werden. Für jeden dieser Lichtwege wird nun ein Zeiger mit gleicher Länge, aber unterschiedlichem Phasenwinkel gezeichnet. Der Phasenwinkel ergibt sich dabei aus der Länge des jeweiligen Lichtwegs, wobei sich der Zeiger für längere Wege weiter entgegen dem Uhrzeigersinn gedreht und eine Umdrehung genau dann gemacht haben soll, wenn das Licht einen Weg, der seiner Basislänge (in der Wellenoptik: Wellenlänge) entspricht, zurückgelegt hat. Schließlich werden alle Zeiger wie Vektoren addiert und das Quadrat des resultierenden Zeigers wird als Wahrscheinlichkeit, im Empfänger eine Wechselwirkung zu erhalten, d.h. als Intensität interpretiert.

Die Vorgehensweise entspricht somit durchaus der Huygens-Fresnelschen, bei der die Intensität in einem Punkt durch die phasenrichtige Addition aller Sekundärwellen berechnet wird, vermeidet aber eine Interpretation, die frühzeitig ein naives Wellenbild festigt, und bedient sich der leicht nachvollziehbaren Technik der Zeigeraddition.

10.3 Zwei Beispiele zur Veranschaulichung

Um das Verfahren den Schülern einsichtig zu machen, wird eine Reihe von Überlegungen und Experimenten nötig sein, für die Vorschläge erarbeitet worden sind (vgl. [Erb94, Erb93, Bad]). Von diesen sollen hier aber nur diejenigen wiedergegeben werden, die direkt zum Phänomen der Beugung gehören.

Wir verwenden zur Berechnung einer Intensität zunächst ein Beispiel, zu dessen Beschreibung zwei Lichtwege ausreichen, die sich – jeder für sich – im Einklang mit der geometrischen Optik ergeben (Abbildung 10.2).

Zwischen Lichtquelle und Empfänger gibt es in diesem Beispiel über zwei teilreflektierende Platten (im wesentlichen) zwei Lichtwege. Für beide Lichtwege wird gemäß ihrer Länge ein Zeiger gezeichnet, wobei der Zeiger für den zweiten Lichtweg etwas weiter als der erste Zeiger gedreht hat. Dabei spielt es keine Rolle, wieviele vollständige Umdrehungen die beiden Zeiger schon absolviert haben. Bei der Addition eröffnet sich dann je nach Abstand der beiden Glasplatten den Schülern ein bislang unbekanntes Phänomen: Verstärkung oder Auslöschung, eben Interferenz. Dazu lässt sich eine Reihe von Experimenten durchführen, von denen hier nur das Erzeugen waagerechter Interferenzstreifen an einer vertikal eingespannten Seifenhaut genannt werden soll.

Im Falle der Beugung am Spalt aber gibt es nach der geometrischen Optik nur jeweils einen Lichtweg zwischen Lichtquelle und Empfänger (also etwa einer Stelle auf einem Schirm), was natürlich nicht zum Phänomen der Beugung führt. Wir müssen also die Ebene der geometrischen Optik noch weiter verlassen, als wir es mit der Verwendung der teilreflektierenden Platten schon getan haben: Wir müssen weitere Lichtwege durch den Spalt berücksichtigen. Da wir die Addition der Zeiger aller, d.h. unendlich vieler Lichtwege nicht durchführen können, begnügen wir uns, eine endliche, aber ausreichend große Zahl von Lichtwegen für die Berechnung zu verwenden (Abbildung 10.3 auf der nächsten Seite). Die Addition ergibt eine Zeigerspirale; die Intensität in dem untersuchten Punkt auf dem Schirm wird durch das Quadrat des resultierenden Zeiger repräsentiert.

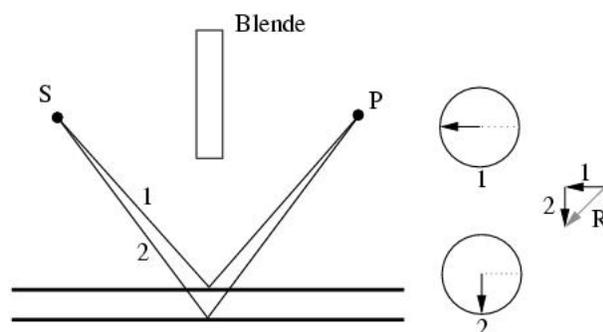


Abbildung 10.2: Addition der Zeiger für zwei Lichtwege zwischen Lichtquelle S und Empfänger P (schematische Darstellung)

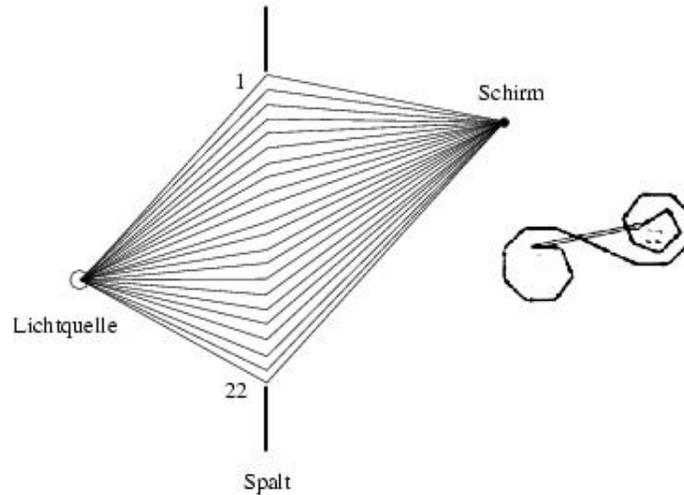


Abbildung 10.3: Addition der Zeiger von 22 Lichtwegen durch einen Spalt (schematische Darstellung)

10.4 Konkrete Beugungsprobleme

Diese grafische Zeigeraddition, bei der dann weiter für jeden Punkt auf den Schirm die Zeiger für eine große Zahl von Lichtwegen berücksichtigt werden müssen, um das gesamte Beugungsbild zu erhalten, ist zur Lösung realer Probleme aber zu zeitaufwendig. Es bietet sich an, einen Computer für diese Aufgabe zu verwenden.

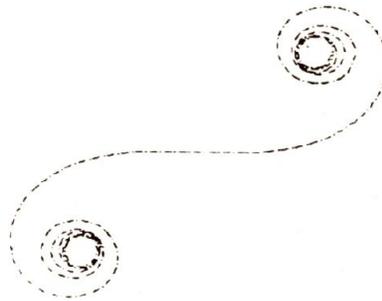


Abbildung 10.4: Zeigeraddition für den zentralen Aufpunkt hinter einem Spalt der Breite 3 mm

Nach der Berechnung mit dem hierfür in Turbopascal erstellten Programm *lw* ergibt sich beispielsweise für den zentralen Aufpunkt in der Entfernung von einem Meter hinter dem Spalt der Breite 3 mm, der von einer punktförmigen Lichtquelle ($\lambda = 633 \text{ nm}$) aus einem Abstand von 0,5 m beleuchtet wird, das in Abbildung 10.4 dargestellte Ergebnis der Zeigeraddition. Die Zeigerspirale setzt sich in diesem Beispiel aus 600 Einzelzeigern zusammen. Um die resultierende Intensität zu erhalten, muss man nun noch den ersten mit dem letzten Zeiger zu einer Resultierenden verbinden und deren Betrag quadrieren. Führt man diese Berechnung für eine Reihe von Punkten auf einem Schirm durch, erhält man das in Abbildung 10.5 dargestellte

Beugungsbild. Die am Nullpunkt der waagerechten Achse aufgetragene Intensität ergibt sich dabei durch die Zeigerspirale aus Abbildung 10.4.

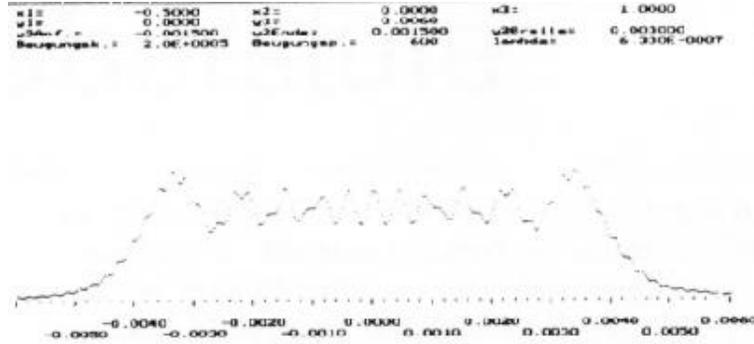


Abbildung 10.5: Beugungsbild; Spaltbreite 3 mm. Nach oben ist die Intensität, nach rechts der Ort auf dem Schirm in Metern aufgetragen

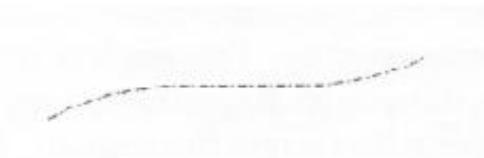


Abbildung 10.6: Zeigeraddition; Spaltbreite 0,4 mm

Für einen vergleichsweise schmalen Spalt sind (unter Beibehaltung der gleich "Dichte" von Lichtwegen) sehr viel weniger Zeiger zu addieren. Abbildung 10.6 zeigt das Ergebnis, das durch Berücksichtigung des kleinen, mittleren Bereichs entsteht. Abbildung 10.7 gibt das Beugungsbild eines solchen Spaltes wieder, das als typisches Fraunhofer-Beugungsbild bekannt ist.

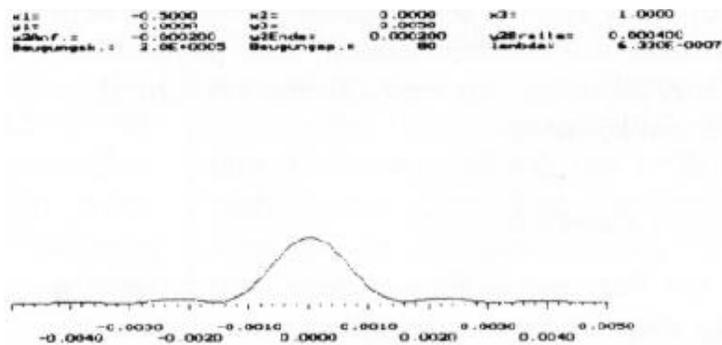


Abbildung 10.7: Beugungsbild; Spaltbreite 0,4 mm.

Lässt man nun den Spalt langsam breiter werden, so kommen links und rechts weitere Zeiger hinzu, wobei die Intensität zunimmt. Dann aber krümmt sich die Spirale nach innen. Obwohl der Spalt breiter wird, muss die Intensität im zentralen Punkt hinter dem Spalt abnehmen!

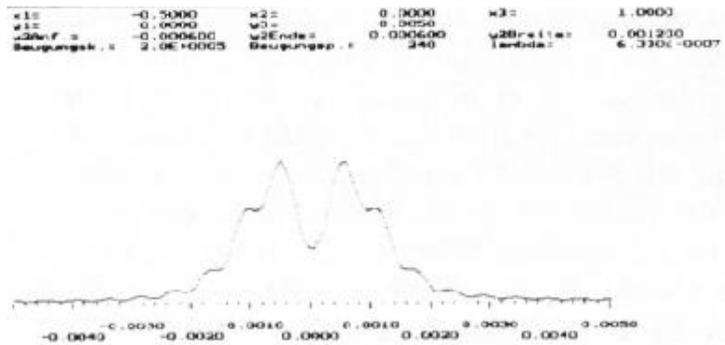


Abbildung 10.8: Beugungsbild; Spaltbreite 1,2 mm.

Das Ergebnis, welches man auf dem Schirm hinter einem Spalt der Breite 1,2 mm erwarten darf, ist in Abbildung 10.8 wiedergegeben. Fotografiert man das Beugungsmuster, das sich im Experiment zeigt, ergibt sich das in Abbildung 10.9 gezeigte Schirmbild. Die Intensitätsverteilung lässt sich nun anhand der Fotografie mit einer Photodiode und einem (y, t) -Schreiber messen. Bei der Auswertung ergibt sich dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit der berechneten Kurve.

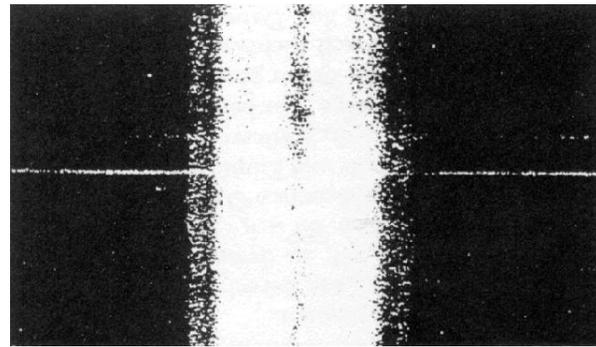


Abbildung 10.9: Photographische Aufnahme des Beugungsbildes; Spaltbreite 1,2 mm

Der zunächst sehr abstrakt erscheinende Zeigerformalismus führt also bei seiner konsequenten Anwendung zu zum Teil überraschenden, aber physikalisch richtigen Ergebnissen, die im Experiment leicht überprüft werden können.

10.5 Weitere Anwendungen

Da alle Parameter, die zur Berechnung benötigt werden, vom Benutzer verändert werden können, kann das Programm in einem breiten Bereich eingesetzt werden. So kann beispielsweise auch die Berechnung von Problemen, wie der Interferenz am idealisierten Doppelspalt oder am Gitter, die Schüler schon auf andere Weise zugänglich waren, durchgeführt werden. Schließlich ist es möglich, die Beugung hinter einer Halbebene (die auch das Ausgangsproblem – Beugung am Schlüssel – repräsentiert) darzustellen.

Da der zugrundeliegende Formalismus, der zu den gezeigten Ergebnissen führt, leicht zu verstehen ist, können sowohl die Zeigerspiralen wie auch die Beugungsbilder mit Schülern im Physikunterricht diskutiert werden, ohne dass die Berechnungen selbst von den Schülern aus-

geführt werden müssen. Es ergibt sich somit ein Zugang zu elementaren Problemen der Beugung, der zudem durch die Sichtweise und die Wahl der verwendeten Begriffe ein verfrühtes Festlegen auf das Wellenmodell vermeidet.

Literaturverzeichnis

- [Bad] BADER, F. *Computer-Programme zu Relativität, QED, Entropie*. ebenda
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb93] ERB, R.: Mit dem Fermat-Prinzip zur optischen Abbildung. In: DPG (Hrsg.): *Didaktik der Physik – Vorträge Frühjahrstagung 1993*. Bad Honnef : DPG GmbH, 1993, S. 239–244
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Hec89] HECHT, E.: *Optik*. Bonn : Addison-Wesley, 1989
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5

Veröffentlichung 11

Warum ist Glas durchsichtig?– Eine Analyse im Rahmen des Lichtwegkonzeptes

Johannes Werner, Lutz Schön

(aus: DPG (Hrsg.). *Didaktik der Physik – Vortrag auf der Tagung in Berlin 1997.*)

Vorbemerkung

Es gibt Stoffe, von denen wir die farbige Oberfläche sehen, manchmal beobachten wir außerdem, dass diese Oberfläche spiegelt, besonders wenn sie glänzend poliert ist. Bei Metallen ist die Eigenschaft des Spiegels noch stärker zu beobachten, dagegen fällt es schwer zu sagen, welche Farbe Metalle besitzen. Bei durchsichtigen Stoffen stellen wir fest, dass wir sie eigentlich überhaupt nicht sehen können. Wir sehen nur den Dreck auf einem Glas, die Dinge, die sich dahinter befinden, und wenn der Hintergrund nicht zu hell ist, sehen wir auch ein deutliches Spiegelbild. Was könnte dafür entscheidend sein, dass das Licht durch manche Stoffe hindurchtritt, manchmal reflektiert wird und zum Teil aber auch von dem Stoff verschluckt wird? Ist das Verhalten des Lichtes nur durch die Oberfläche des Materials bestimmt? Das wäre für die Reflexion plausibel, die Eigenschaft, Licht zu verschlucken (absorbieren) hängt aber von der Stärke des Materials ab. Auch das Hindurchtreten des Lichtes durch einen Körper kann nicht nur von seiner Oberfläche bestimmt werden, wenn man davon ausgeht, dass die Oberfläche aus den gleichen Bausteinen wie das Innere des Körpers zusammengesetzt ist. Wenn es überhaupt eine einzige verantwortliche Größe gibt, die das Verhalten des Lichtes bestimmt, so muss sie mit den Bausteinen des Stoffes, also seinen Atomen oder Molekülen, zusammenhängen.

Im Gegensatz zu der vereinfachten Beschreibung, bei der die optischen Prozesse (partielle Reflexion und Brechung) an den Grenzschichten zwischen den verschiedenen Medien stattfinden, gehen wir davon aus, dass das Licht, wenn es in einen Stoff eindringt, auf Wegen zwischen den Atomen hindurchgeht, dabei aber durchaus auch mit den Atomen zusammenstoßen kann. Wie oft dies passiert und ob das Licht trotzdem weiterlaufen kann, bestimmt das nach außen hin sichtbare Verhalten des Lichtes in diesem Stoff. Die Werte des Brechungsindex, der Lichtausbreitungsgeschwindigkeit und der Intensitäten des partiell reflektierten Lichtes sollen bei dieser Vorgehensweise als Ergebnis bestimmt werden können. Dabei werden die engen Zusammenhänge zwischen den Größen besonders deutlich.

Der Vortrag soll den fachlichen Hintergrund der Lichtausbreitung im Medium erläutern, wobei anstelle der hochschulüblichen Darstellung im Wellenmodell [Hec89] eine Beschreibung mit Hilfe des Zeigerformalismus gewählt wird. Das Problem wird dabei auf die elementaren Vorgänge reduziert: Licht wird am Atom gestreut bzw. Licht passiert ein Atom ungehindert.

11.1 Zeigerformalismus im Lichtwegkonzept

Ich möchte kurz auf den Zeigerformalismus eingehen, der in dem von Schön und Erb [Erb94, ES97] entwickelten Lichtwegkonzept ein wesentlicher Bestandteil ist und, wie auch die Behandlung der Lichtausbreitung im Medium, auf eine Idee Feynmans [Fey88] zurückgeht.

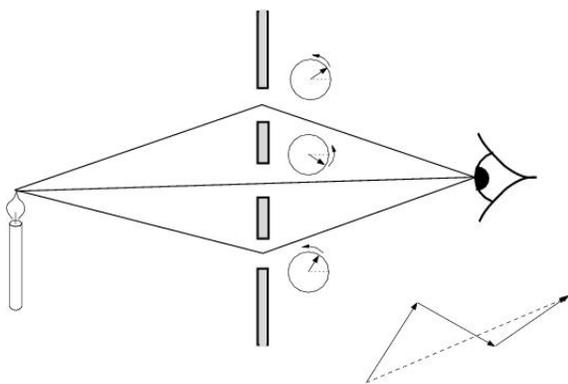


Abbildung 11.1: Zum Zeigerformalismus

Wir gehen davon aus, dass sich Licht auf Lichtwegen von einer Quelle zu einem Empfänger ausbreitet. Den Lichtwegen werden Zeiger zugeordnet, die sich beim Fortschreiten des Lichts auf den Wegen entgegen dem Uhrzeigersinn drehen, und zwar derart, dass sie sich einmal um 360° gedreht haben, wenn das Licht eine für seine Farbe charakteristische Basislänge zurückgelegt hat (Abbildung 11.1). Entsprechend der unterschiedlichen Längen der verschiedenen Lichtwege, stehen die Zeiger bei der Ankunft des Lichtes im Empfänger auf unterschiedlichen Positionen.

Addiert man die Zeiger wie Vektoren und quadriert die Resultierende, so erhält man die relative Intensität des Lichtes am Ort des Empfängers. So lassen sich beispielsweise die Intensitätsverteilungen hinter Beugungsgittern und Spalten berechnen.

Der Formalismus besagt, dass alle möglichen Lichtwege von der Quelle zum Empfänger zu berücksichtigen sind, aber es zeigt sich, dass diejenigen, welche der geometrischen Optik gehorchen, in der Hauptsache zum Ergebnis beitragen. Davon abweichende Lichtwege variieren

so stark in ihrer Länge, dass ihre Zeiger in vollkommen unterschiedliche Richtungen zeigen und somit effektiv nichts zur Länge der Resultierenden beitragen.

11.2 Konzept zur Beschreibung der Lichtausbreitung im Medium

Beim Durchgang des Lichtes durch ein Medium können wir uns nach dem oben Gesagten auf die Betrachtung geradliniger Lichtwege von der Quelle zum Empfänger beschränken. Was könnte mit dem Licht passieren, wenn ein Lichtweg an einem Atom vorbeiführt?

1. Das Licht könnte einfach ungehindert vorbeigehen, ohne dass eine Wechselwirkung (eine Streuung) stattfindet.
2. Es könnte eine Streuung auftreten, nach der das Licht entweder weiter nach vor oder in Richtung Lichtquelle zurück geht.

Eine Streuung zur Seite schließen wir bei unseren Berechnungen aus, da sie im Experiment nicht beobachtet wird. Der ursprüngliche Lichtweg wird also in drei Wege aufgespalten, und wir untersuchen nun, was mit den sich drehenden Zeigern während dieser Aufspaltung passiert. Es gibt prinzipiell nur zwei Möglichkeiten, nämlich die Veränderung der Zeigerlängen und zusätzliche Zeigerdrehungen.

Die Veränderung der Zeigerlängen kann nur so erfolgen, dass die Intensität vorher und nachher übereinstimmt, bzw. sich im Falle eines absorbierenden Mediums durch die Umwandlung von Licht in andere Energieformen verringert. Wie wir die Intensitäten des Lichtes auf den drei Wegen ermitteln, sagt uns der Zeigerformalismus: Die Intensität des Lichtes ist vor dem Prozess durch das Quadrat der Zeigerlänge gegeben. Hinterher setzt sie sich durch das Quadrat des Zeigers für den Weg des zurückgestreuten Lichtes (R) und das Quadrat der vektoriell addierten Zeiger der Wege des nach vorn gestreuten (S) und des ungehindert passierenden Lichtes (P) zusammen (Abbildung 11.2).

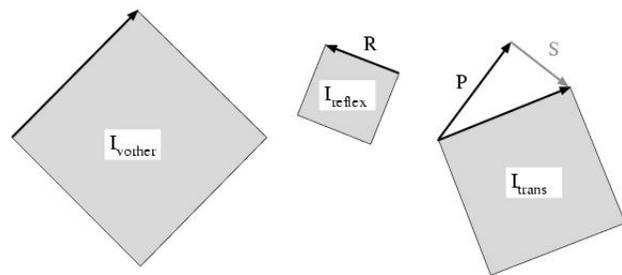


Abbildung 11.2: Bildung der Intensität

Eine zusätzliche Drehung der Zeiger findet tatsächlich bei der Streuung statt. Wir wollen die Größe der Drehung nicht einfach angeben, sondern, um sie plausibel zu machen, etwas weiter ausholen und die Eigenschaft der Atome bei dem Streuvorgang untersuchen.

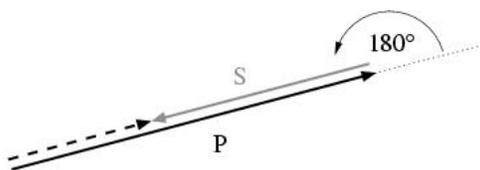
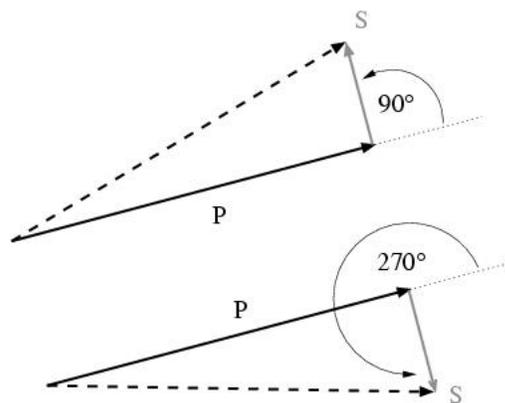


Abbildung 11.3: Absorption von Licht

übernehmen. Dieser Vorgang, bei dem das Licht an Intensität verliert, findet aber nicht bei jeder Streuung statt, sondern dann, wenn das Licht eine bestimmte zu dem Atom passende Basislänge besitzt. Diese passende Basislänge kann eine einzelne Farbe sein, es kann sich aber auch um einen breiteren Bereich aus mehreren Farben handeln, im Übrigen muss der Wert nicht im Sichtbaren liegen. Liegt die Basislänge des Lichtes außerhalb des zum Atom passenden Bereichs, dann ist die Übertragung der Energie um so unwahrscheinlicher, je größer die Abweichung ist.

Das Atom gibt die aufgenommene Energie in der Regel nicht wieder in Form von Licht ab, sondern kann sie entweder speichern oder in Form von Wärme wieder ausstrahlen. Dies geschieht bei Stoffen, die Licht absorbieren.

Wie können wir nun diesen Vorgang mit Hilfe der Zeiger beschreiben? Die Intensität des fortschreitenden Lichtes ergibt sich durch die vektorielle Addition der beiden Zeiger für das nach vorn gestreute (S) und das passierende Licht (P). Würden diese Zeiger in verschiedenen Winkeln zueinander stehen, so ergäben sich unterschiedliche Intensitäten. Ein Minimum der Intensität würde erreicht, wenn sie im Winkel von 180° zueinander stünden (Abbildung 11.3).



Wir wollen annehmen, dass in der Tat ein Zeiger durch eine Streuung eine Drehung um 180° erfährt, wenn die Basislänge des Lichtes diesen zum Atom passenden Wert hat. Andernfalls soll die Größe der Drehung von 180° abweichen, was dann die niedrigere Wahrscheinlichkeit für die Energieübertragung ausdrückt. Sie soll für wesentlich niedrigere Basislängen 90° und wesentlich größere 270° betragen (Abbildung 11.4).

Damit haben wir im Prinzip den ganzen Formalismus beschrieben. Die Lichtwege verzweigen sich bei jedem Atom in drei neue Wege. Die Zeiger drehen sich wie üblich während der Lichtausbreitung längs des Weges und werden jedesmal, wenn sie an einem Atom vorbeiführen,

Wir wissen, dass bei der Ausbreitung von Licht Energie übertragen werden kann und zwar portionsweise, wobei die Größe der Portionen (Quanten) von der Basislänge des Lichtes und damit auch der Farbe abhängig ist. Die Atome sind in der Lage, die Energiequanten des Lichtes bei einer Streuung zu

Abbildung 11.4: Absorption von Licht für niedrigere und größere Basislängen

verkürzt. Auf den Wegen, auf denen das Licht nach vorn oder zurück gestreut wird, findet die zusätzlich Drehung statt, deren Größe wir aufgrund der Basislänge des Lichtes und der Eigenschaft der Atome, Lichtenergie aufzunehmen, abschätzen können. Die Lichtwege unterscheiden sich also darin, wie oft das Licht gestreut wird, und ihre Längen können dabei stark variieren.

11.3 Lichtausbreitung im Glas

Der beschriebene Formalismus zur Ausbreitung des Lichtes im Medium basiert auf einigen hypothetischen Annahmen. Seine Funktion soll daher anhand der Ausbreitung des Lichtes durch eine Glasplatte untersucht werden. Zur Anwendung unseres Formalismus benötigen wir drei Größen:

1. Wir wollen annehmen, dass die Absorption von Licht bei dem Streuprozess vernachlässigbar klein ist.
2. Wir benötigen den Drehwinkel, bei der die Streuung auftritt. Glas absorbiert UV-Licht. Die Atome des Glases nehmen also Energie des Lichtes auf, wenn die Basislänge im UV-Bereich liegt. Benutzen wir für unsere Untersuchung Licht aus dem sichtbaren Bereich, so ist dessen Basislänge erheblich niedriger, so dass wir von einem Drehwinkel des Zeigers bei der Streuung von 90° ausgehen.
3. Offen bleibt zunächst die Länge des Zeigers für die Wege, auf denen eine Streuung stattfindet. Es ist eine Größe, mit der der Formalismus dem an das jeweilige Medium angepasst wird. Sie wird sicherlich sehr klein sein, so dass wir zunächst kleine Werte ausprobieren, bevor wir die richtige Größe verstehen werden. Daraus ergibt sich die Länge des Zeigers für das Passieren der Atome.

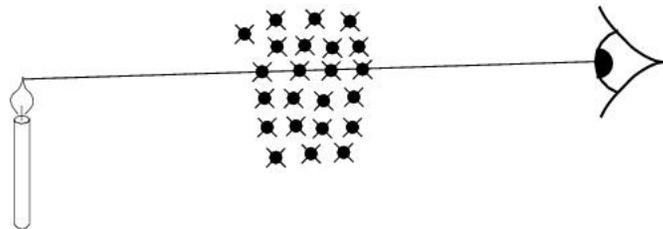


Abbildung 11.5: Lichtweg ohne Streuung

Zeichnen wir uns einfach einmal die Zeiger für die Lichtwege auf. Es gibt zunächst einen Weg, auf dem das Licht an allen Atomen (in der Abbildung 11.5 sind es vier) vorbeigeht, ohne ein einziges Mal gestreut zu werden. Die Länge des Zeigers ist fast die Ausgangsgröße des Zeigers

bei der Lichtaussendung; die Richtung hängt von der gesamten Weglänge ab. An den ersten Zeiger hängen wir nun die Zeiger für die Lichtwege, auf denen das Licht einmal an einem Atom nach vorn gestreut wurde. Diese Lichtwege haben alle die gleiche Länge wie der erste, die Zeiger werden aber zusätzlich um 90° gedreht und sind aufgrund der Streuung viel kürzer.

Was kann man daraus ablesen? Der resultierende Zeiger des transmittierten Lichtes (Abbildung 11.6, links) ist gegenüber einem Lichtzeiger, der zu einem gleichlangen Weg im Vakuum gehört (Abbildung 11.6, rechts) stärker gedreht. Da eine volle Zeigerdrehung einer Wegstrecke der Basislänge entspricht, diese durch die zusätzliche Drehung aber bereits früher erreicht wird, muss die Basislänge des Lichtes im Medium kleiner als im Vakuum sein. Es erscheint, als müsse das Licht bei jedem Passieren eines Atoms eine extra

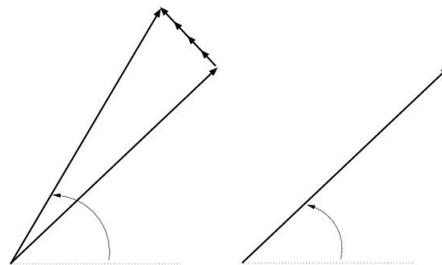


Abbildung 11.6: Erklärung für die kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in beliebigen Medien

Hürde überklettern, währenddessen sich einerseits der Zeiger weiter dreht, andererseits eine zeitliche Verzögerung auftritt, die einer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Glas entspricht. Das Verhältnis der Basislänge des Lichtes im Vakuum zu der verkürzten Basislänge im Medium Glas ist gleich dem Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Glas (Brechungsindex).

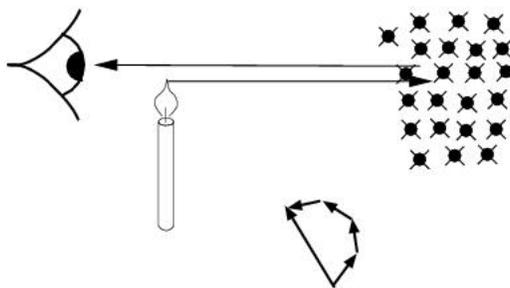


Abbildung 11.7: Reflexion von Licht

Die Lichtwege, auf denen das Licht das Medium nach einer Streuung in Richtung der Lichtquelle verlässt, sind, je nachdem wie weit im Inneren die Streuung stattgefunden hat, in ihrer Länge unterschiedlich. Die Zeiger weisen daher in unterschiedliche Richtungen, haben aber die gleiche Länge. Zusammengesetzt bilden die Zeiger ein Kreissegment (Abbildung 11.7). In Abhängigkeit der Plattenstärke wird ein mehr oder weniger vollständiger Kreis gebildet, wodurch die Länge der Resultierenden und damit die Intensität schwankt. Das entspricht unserer Beobachtung an dünnen Schichten, wo sich Intensitätsschwankungen von 0 bis 16%

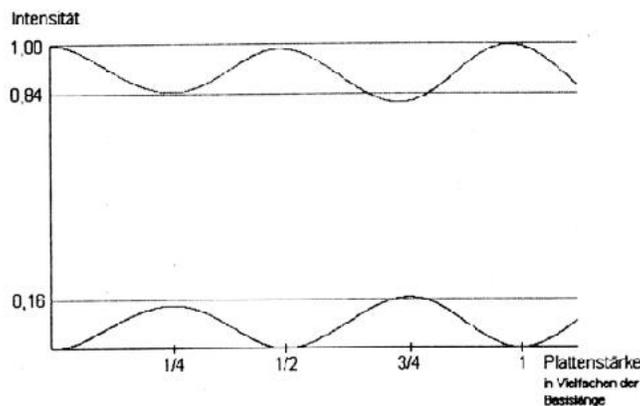


Abbildung 11.8: Intensitäten des reflektierten und des transmittierten Lichtes

messen lassen. Dadurch lässt sich nun auch nachträglich die Größe der Zeiger bei der Streuung bestimmen.

Berücksichtigt man bei den Berechnungen mögliche Mehrfachreflexionen, so zeigen sich auch im transmittierten Licht Intensitätsschwankungen. Der dabei enorme Rechenaufwand, für die vielen Lichtwege sollte dann von einem Computer geleistet werden. Es zeigt sich dabei, dass sich die im Experiment messbaren Größen, wie der Brechungsindex und die Intensitäten von reflektiertem und transmittiertem Licht, recht gut reproduzieren lassen. Abbildung 11.8 zeigt die berechneten Intensitäten des reflektierten (unterer Graph) und transmittierten Lichtes (oberer Graph) in Abhängigkeit der Stärke der Glasplatte. Zur Berechnung wurden alle möglichen Lichtwege mit bis zu vier Reflexionen innerhalb der Glasplatte berücksichtigt.

11.4 Ein Thema für Schule?

Wir sind uns noch nicht im Klaren darüber, ob dieses interessante aber auch schwere Thema im Rahmen des Lichtwegkonzeptes in den Optikunterricht eingegliedert werden könnte. Wir gehen aber davon aus, dass die elegante Beschreibung der Prozesse mit Zeigern für Schüler leichter verständlich ist.

Mit dem Konzept könnte weiter untersucht werden, wie die gewählten Parameter (Zeigerlängen und Drehungen für den einzelnen Streuprozess und die Größe der atomaren Absorption) die Eigenschaften eines Mediums bestimmen. So könnte nachvollzogen werden, wie die Dispersionskurve eines Mediums aussehen muss, wieso Metalle glänzen und undurchsichtig sind, wieso Farbfilter nur Licht bestimmter Farben hindurchlassen oder ganz allgemein, wieso uns Gegenstände in einer bestimmten Farbe erscheinen.

Literaturverzeichnis

- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES97] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: FISCHER, H.E. (Hrsg.): *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmlers Verlag, 1997
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Hec89] HECHT, E.: *Optik*. Bonn : Addison-Wesley, 1989

Veröffentlichung 12

Das Loch in der Seifenblase – Ein überraschendes Phänomen aus der Interferenzoptik und seine Beschreibung im Zeigerformalismus

Thomas Weber

(aus: *Physik in der Schule* 37 (1999) 1, S. 34-36)

Vorbemerkung

Die Interferenzeigenschaft des Lichts wird in der Schule häufig anhand von Beugungsexperimenten erschlossen. Dieses Vorgehen bietet sich an, wenn im vorangegangenen Unterricht entsprechende Experimente mit Wasserwellen durchgeführt wurden, deren Ergebnisse dann in Analogiebetrachtungen auf die Experimente mit Licht übertragen werden können, und wenn das Verhalten des Lichts nachfolgend im Wellenmodell dargestellt werden soll, z.B. in [DB86].

Allerdings können das vorzugsweise verwendete Laserlicht sowie die geringe Größe der benötigten Beugungsobjekte bei den Schülern leicht den Eindruck erwecken, dass Interferenzerscheinungen nur im Labor des Physikers eine Rolle spielen und sich kaum mit dem Verhalten des Lichts außerhalb des Physikraums in Verbindung bringen lassen. Eine seltener genutzte Möglichkeit besteht darin, Interferenzen ausgehend von Beobachtungen an Seifenhäuten einzuführen. Die schillernden Farben von Seifenblasen sind den Schülern aus der Alltagswelt bekannt und üben auf die meisten von ihnen auch einen ästhetischen Reiz aus. Das im folgenden vorgestellte Phänomen erlaubt nicht nur überraschende Beobachtungen zur Interferenz

an dünnen Schichten, sondern gibt dem Lehrer darüber hinaus die Möglichkeit, vertiefend auf den Phasensprung bei der Reflexion am Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium einzugehen.

12.1 Beobachtung des Loches in einer Seifenblase

Um eine Seifenlösung herzustellen, die für diesen Versuch geeignet ist, mischt man ein handelsübliches Spülmittel, Glycerin und destilliertes Wasser zu gleichen Anteilen [Wal92]. Ein kleinerer Anteil Glycerin verringert die Stabilität der Seifenblasen, lässt sie aber dafür farbenprächtiger und weniger schlierig aussehen. Aus der Lösung werden mit Hilfe eines Strohhalmes Seifenblasen erzeugt, die man vorsichtig auf einer offenen Filmdose aus Kunststoff ablegt, unter eine luftdicht abgeschlossene Glasglocke bringt – hierfür sind im Kaufhaus erhältliche Vorratsgläser aus Glas geeignet – und dort möglichst erschütterungsfrei stehen lässt. Solche Seifenblasen sind dann erstaunlich stabil und können eine Lebensdauer von über einer Stunde haben.

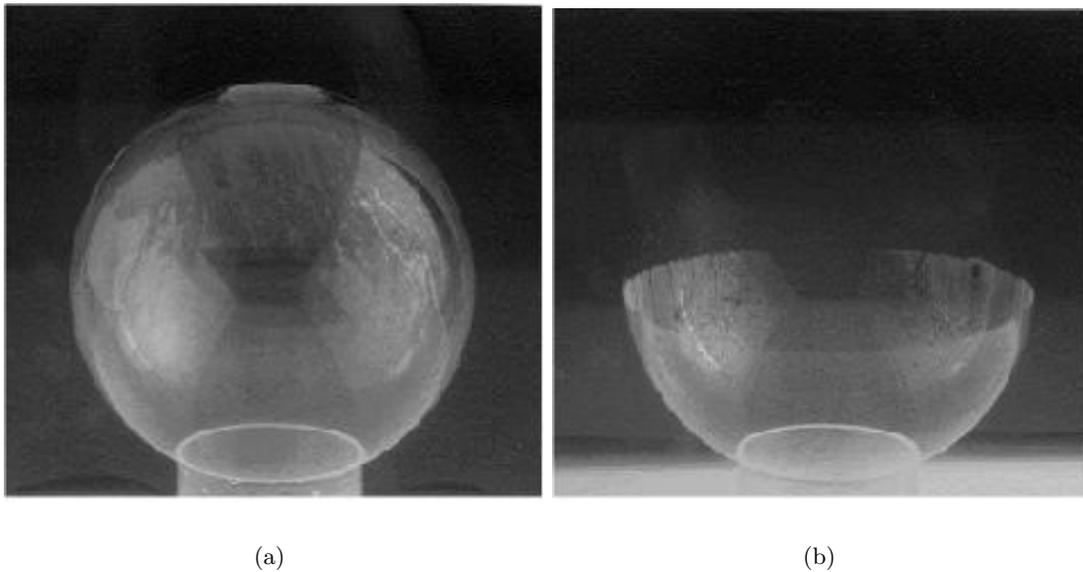


Abbildung 12.1: Das "Loch" in der Seifenblase nach unterschiedlich langer Zeit: (a) An der Oberseite der Seifenblase wird ein kleiner Bereich des Films unsichtbar, der Rand ist hier noch unregelmäßig; (b) Später umfasst das "Loch" mehr als die Hälfte des Films. Fotos: V. Döring

Bereits nach wenigen Minuten beobachtet man auf der Oberseite der Seifenblase ein kreisförmiges, auffällig scharf gegen die übrige Seifenhaut begrenztes "Loch", welches sich allmählich vergrößert. Solange die Seifenblase nicht platzt, wächst dieses "Loch" immer weiter und lässt nach einiger Zeit das obere Drittel der Seifenhaut, schließlich die gesamte Seifenblase ver-

schwinden. Bei genauem Hinsehen sind ferner winzige "Löcher" zu entdecken, die sich im unteren Teil der Seifenhaut bewegen und irgendwann mit dem "Loch" auf der Oberseite verschmelzen (Abbildung 12.1 auf der vorherigen Seite).

Blickt man von der Seite auf die Seifenblase, so sind im Bereich des "Loches" schwache Reflexe zu erkennen, die den aufmerksamen Beobachter vermuten lassen, dass es sich nicht wirklich um ein "Loch" handelt, sondern dass die Seifenhaut dort sehr dünn wird. Die Erfahrung sagt ihm auch, dass eine Blase mit einem Loch eigentlich platzen müsste, da der Seifenfilm nach Wegfallen der Differenz zwischen Außen- und Innendruck aufgrund seiner Oberflächenspannung sofort zu Tröpfchen zusammenfallen würde.

12.2 Physikalische und chemische Hintergründe

In einer Seifenhaut befindet sich an beiden Oberflächen eine Schicht parallel ausgerichteter Seifenanionen, deren langkettige Säurereste nach außen gerichtet sind, dazwischen eine wässrige Seifenlösung. Die Dicke der Seifenhaut liegt gewöhnlich in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ [Ise78]. Eine Reihe unterschiedlicher Prozesse führt dazu, dass die Seifenhaut mit der Zeit stellenweise beträchtlich dünner wird und es damit zur Bildung der beschriebenen "Löcher" kommt:

Aufgrund der Schwerkraft kommt es in vertikal ausgerichteten Teilen des Seifenfilms zu einem nach unten gerichteten viskosen Fluss der Lösung im Inneren des Seifenfilms. Da sich die Flüssigkeit unten sammelt, führt dieser Prozess zu einem Ausdünnen der Seifenhaut im oberen Bereich. Hingegen hat die Verdunstung, also der Austritt von Wasser aus der Lösung im Inneren, eine gleichmäßige Ausdünnung zur Folge.

Bereiche geringerer Dicke können sich in der übrigen Seifenhaut bewegen. Da sie leichter sind als Bereiche mit größerer Schichtdicke, steigen sie nach oben, ähnlich wie Luftblasen im Wasser. Viele kleine "Löcher" sammeln sich auf diese Weise an der Oberseite der Seifenblase, verschmelzen dort und ergeben das große "Loch" mit wachsendem Durchmesser. Aufgrund von Flüssigkeitsströmungen, vor allem am Rand der Seifenblase, mit dem sie auf der Filmdose aufliegt, wird diese Aufwärtsbewegung durch anders gerichtete Bewegungen überlagert.

Ursache für die scharfe Begrenzung des "Loches" sind die zwischen den Teilchen in der Flüssigkeit wirkenden Van-der-Waals Kräfte und die Dickenunterschiede im Seifenfilm am Rand

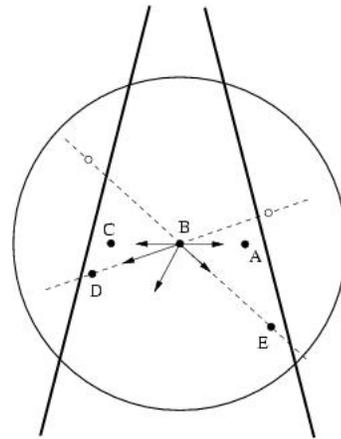


Abbildung 12.2: Van-der-Waals Kräfte zwischen einzelnen Teilchen innerhalb der Seifenhaut am Rand eines Loches. Darstellung im Querschnitt, vereinfacht nach [Ise78]

des "Loches": Betrachtet man ein Teilchen A das auf das Teilchen B eine Van-der-Waals Kraft ausübt, so findet man meist auch ein Teilchen C , welches eine gleich große, aber entgegengerichtete Kraft auf B ausübt (Abbildung 12.2 auf der vorherigen Seite). Andererseits gibt es aufgrund des Dickenunterschieds im Seifenfilm beispielsweise Teilchen D und E , die sich an solchen Orten befinden, dass es innerhalb des Seifenfilms keine gegenüberliegenden Teilchen gibt, welche die ausgeübten Van-der-Waals Kräfte ausgleichen könnten. Es kommt zu einer resultierenden Kraft auf das Teilchen B , die zur dickeren Seite hin gerichtet ist und somit den vorhandenen Dickenunterschied verstärkt. Dieser Wirkung der Van-der-Waals-Kräfte ist die Oberflächenspannung entgegengerichtet, welche zu einer möglichst kleinen Oberfläche führt [Ise78].

Das Potential, das die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen in der Seifenhaut beschreibt, besitzt zwei Minima bei einer Filmdicke von etwa 50 bzw. 300 μm [Ise78]. Demnach ist dieser dünne Zustand der Seifenhaut stabil und stellt sich allmählich von selbst ein, wenn die Seifenblase nicht vorher platzt.

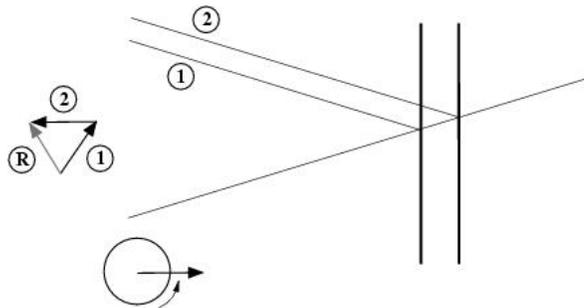
12.3 Die Darstellung im Zeigerformalismus

Im Unterricht lassen sich unter Verwendung des nach einer Idee von Feynman entwickelten Zeigerformalismus [Erb95, ES96] nun Überlegungen anstellen, die von den Beobachtungen der Schüler zu einer neuen – dem Phasensprung in der Wellenoptik entsprechenden – Regel führen. Dabei werden rotierende Zeiger zum Vermessen von Lichtwegen benutzt und für jeden möglichen Lichtweg die Zeigerstellung nach Durchlaufen des Lichtwegs notiert.

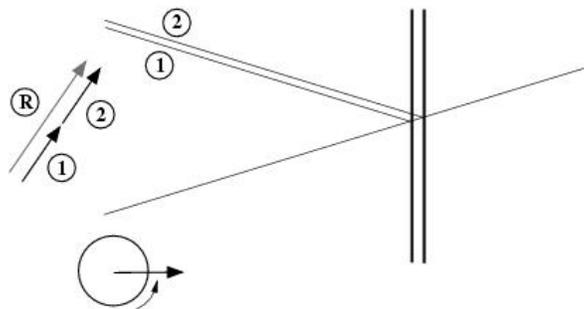
Für das Beispiel der Seifenblase reicht es, die beiden Lichtwege zu betrachten, die bei der Reflexion an beiden Grenzflächen des Seifenfilms entsprechend dem Reflexionsgesetz verlaufen. Die beiden wegen der Wegdifferenz unterschiedlichen Endstellungen ① und ② der zugehörigen Zeiger werden dann vektoriell addiert (Abbildung 12.3 auf der nächsten Seite). Die Länge des resultierenden Vektors R (genauer: sein Betragsquadrat) ist ein Maß für die Intensität, die sich aus der Interferenz der an beiden Grenzflächen reflektierten Anteile ergibt.

Wenn die Seifenhaut ganz dünn wird, dann sind die beiden betrachteten Lichtwege fast gleich lang, d.h. dann müssten auch die Zeigerstellungen nach Durchlaufen der beiden Lichtwege fast gleich sein. Daraus folgt maximale Verstärkung bei der Interferenz, und zwar unabhängig von der Basislänge des Lichts, d.h. man müsste einen hellen weißen Reflex sehen. Man beobachtet aber das Gegenteil!

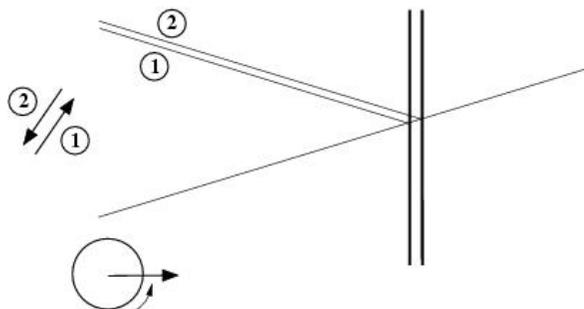
Dieser Widerspruch lässt sich durch Einführung einer zusätzlichen Regel auflösen: Bei der Reflexion findet am Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium eine zusätzliche Zeigerdrehung um 180° statt. Dieser Regel entspricht im Wellenmodell die Einführung eines Phasensprungs.



(a) Prinzip der Darstellung



(b) Schichtdicke klein gegen die Basislänge



(c) Schichtdicke klein gegen die Basislänge; Berücksichtigung der zusätzlichen Zeigerdrehung um 180° auf dem Lichtweg ①

Abbildung 12.3: Darstellung der Interferenz an dünnen Schichten im Zeigerformalismus. Der nach rechts fortgesetzte Lichtweg soll andeuten, dass es auch transmittiertes Licht gibt.

12.4 Einsatz des Phänomens im Optikunterricht

Im herkömmlichen Physikunterricht wird der Phasensprung bei der Reflexion von Licht am Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium in der Regel durch Ana-

logieversuche aus der Mechanik (Reflexion einer Seilwelle am losen Ende) veranschaulicht. Dieses Vorgehen birgt eine Reihe von Gefahren für das Verständnis der Schüler, nämlich die eingeschränkte Überzeugungskraft der Analogie, den geringen Zusammenhang mit dem vorangegangenen Optikunterricht, der ein Zurückgreifen auf Vorkenntnisse verhindert, sowie die Förderung einer anschaulichen mechanistischen Wellenvorstellung vom Licht.

Das Loch in der Seifenblase kann als Realexperiment eine größere Überzeugungskraft haben als die Analogie, und es lässt sich besser in den Optikunterricht einbetten, insbesondere wenn Interferenzen auch am Beispiel von Seifenhäuten eingeführt wurden. Jedoch kann dieses Phänomen allein eine anschauliche Wellenvorstellung nicht verhindern, wenn zu seiner Deutung im Unterricht immer noch Wellen gezeichnet werden müssen.

Das zuletzt genannte Problem spielt bei einem Unterricht im Rahmen der Zeigeroptik keine Rolle, da der Zeigerformalismus abstrakt genug ist, um eine anschauliche (Fehl-)vorstellung zu verhindern. Das beschriebene Phänomen ist für die Schüler, nachdem sie schon vorher Beispiele kennengelernt haben, ein weiterer Beleg für die Erklärungsmächtigkeit des Zeigerformalismus. Es erlaubt dem Lehrer, die zusätzliche Zeigerdrehung bei der Reflexion ausgehend von Beobachtungen der Schüler einzuführen, was dem in der Optik mit Lichtwegen grundsätzlich angestrebten Vorgehen entspricht. Schließlich trägt es zur Förderung der vertikalen Vernetzung aufeinanderfolgender Unterrichtsinhalte bei, nämlich indem Interferenzphänomene bereits an Seifenhäuten eingeführt werden und indem die Regel für die Zeigerdrehung durch Berechnung von Intensitätsbilanzen mit dem Zeigerformalismus im Unterricht überprüft werden kann.

Literaturverzeichnis

- [DB86] DORN ; BADER. *Physik, Oberstufe Gesamtband 12/13*. 1986
- [Erb95] ERB, R.: Curved Mirrors. In: *Physics Education* 30 (1995), S. 287–289
- [ES96] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittelstufe. In: *PdN-Physik* 45 (1996), Nr. 8, S. 31–36
- [Ise78] ISENBERG. *The Science of Soap Films and Soap Bubbles*. 1978
- [Wal92] WALKER. *Ein Knick in der Optik*. 1992

Teil IV

Fachdidaktische Forschung

Veröffentlichung 13

Fachdidaktische Forschungen am Beispiel eines Curriculums zur Optik

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: H. Bayrhuber et al. (Hrsg.). *Lehr-/Lernforschung in den Fachdidaktiken*. Innsbruck : Studienverlag. 2001)

Vorbemerkung

Am Beispiel fachdidaktischer Forschungen im Rahmen der Entwicklung und Erprobung des Curriculums "Vom Sehen zur Optik" soll deutlich werden, dass solche Arbeiten hinsichtlich ihrer Zielsetzung, ihrer Methoden und ihres theoretischen Hintergrundes sehr unterschiedlich einzuordnen sind. Es wird vorgeschlagen, drei Forschungsansätze der Fachdidaktik zu unterscheiden, *fachinhaltliche fachdidaktische Forschung*, *Evaluationsforschung* und *empirische pädagogische Forschung*. Diese Ansätze werden kurz skizziert und mit Beispielen unserer Arbeiten illustriert.

13.1 Einleitung

Nahezu alle fachdidaktischen Arbeiten haben ihren Ursprung in einer mehr oder minder großen Unzufriedenheit mit dem Ergebnis des Unterrichts. Diese implizite Evaluation der Praxis bildet die Basis für zahllose Vorschläge zur Veränderung des Unterrichts.

Änderungen der Unterrichtspraxis setzen u.a. voraus, dass die Inhalte einer genauen Prüfung unterzogen werden, ob und in welcher Weise sie als Lerninhalte für das jeweilige Fach geeignet sind. Das Fach selbst wird zu befragen sein, ob es weitere, neue oder alternative Themen bereithält, die dann für den Lernprozess aufbereitet werden müssen. Fachdidaktische Arbeiten die sich diesem Aufgabengebiet widmen, wollen wir hier *fachinhaltliche fachdidaktische Forschung*¹ nennen; in der Mathematikdidaktik wird diese Richtung *Stoffdidaktik* genannt [Jah98, Rei95].

Die aus solchen Arbeiten entwickelten Vorschläge müssen in der Praxis erprobt werden. Hierfür sind im ersten Schritt zunächst kleine Fallstudien erforderlich, die lediglich nachweisen, dass die vorgeschlagenen Inhalte lehr- und von der Zielgruppe lernbar sind. Gegebenenfalls nach einer Revisionsphase wird eine Feldstudie den Nachweis erbringen müssen, ob die Veränderungen eine Verbesserung der Praxis erbringen. Solche fachdidaktischen Arbeiten werden hier als *Evaluationsforschung* bezeichnet.

Nicht nur die Ähnlichkeit der Probleme des Lehrens und Lernens in den unterschiedlichen Fächern, sondern auch die Erfahrungen der empirischen pädagogischen Forschung und deren gesichertes Methodenreservoir machen empirische pädagogische Arbeiten in der Fachdidaktik notwendig. Ohne die Zielsetzung fachdidaktischer Arbeiten – die Verbesserung des konkreten Fachunterrichts – aus dem Blick zu verlieren, sollten Fachdidaktiker ihren *domänenspezifischen* Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Lehrens und Lernens leisten; diese Arbeiten bezeichnen wir hier als *empirische pädagogische Forschung*.²

In seinem Übersichtsbeitrag zur Forschung in der Physikdidaktik geht Duit in diesem Band ausführlich auf die unterschiedlichen Forschungsschwerpunkte ein und wählt eine ähnliche Systematik.

13.2 Fachdidaktische Forschung am Optikcurriculum

Seit Mitte der achtziger Jahre wurde zunächst an der Gesamthochschule Kassel und seit einigen Jahren an der Humboldt-Universität zu Berlin, an einer Neuorientierung der Optik für den Schulunterricht gearbeitet. Es ist ein Curriculum entstanden, das im Anfangsunterricht das Sehen der Dinge zum Ausgangspunkt nimmt und daraus die Grundbegriffe der Optik entwickelt, im zweiten Teil mit dem Fermat-Prinzip eine erste abstrakte Beschreibung des Lichts erarbeitet und in der Oberstufe mit dem Zeigerformalismus von Feynman bis in die Welt der Quantenphysik führt. Von zentraler Bedeutung ist der Begriff des Lichtwegs, der das ganze Curriculum durchzieht (vgl. [ES95]).

¹Auf einen passenderen Terminus sollten sich die Fachdidaktiker bald einigen; der vorgeschlagene Terminus trifft zwar den Inhalt, ist aber doch eher unhandlich.

²Auch dieser Terminus ist zu diskutieren. Das spezifisch fachdidaktische an dieser Forschung kommt im Terminus nicht zum Ausdruck

Da nur zum Mittelstufenteil des Curriculums, der "Geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip" Ergebnisse auf allen drei Forschungsebenen vorliegen, wird hier der Schwerpunkt unserer Darstellung liegen.

13.2.1 Fachinhaltliche fachdidaktische Forschung

Angesichts des Defizits an einer aktuellen und geschlossenen Theorie fachinhaltlicher fachdidaktischer Forschung wurde bei der didaktischen Konzeption des Curriculums im wesentlichen auf drei Quellen zurückgegriffen: ältere didaktische Theorien, beispielsweise von Wagenschein (siehe [Erb94, 7ff]); die jeweils aktuellen Ergebnisse didaktischer Forschung über Präkonzepte in der Optik oder die TIMS-Studie; wissenschaftstheoretische Überlegungen, beispielsweise von Ernst Mach oder Carl Friedrich von Weizsäcker [ES96],[Erb94, 9ff].

Daran anknüpfend wurden "Leitziele" für die Konstruktion des Curriculums festgelegt, die als roter Faden für alle weiteren Arbeitsschritte dienen und für eine gewisse Konsistenz des Unterrichtskonzepts sorgen sollen: Die Priorität des Verstehens physikalischer Zusammenhänge gegenüber dem Wissen von Fakten, die Bildung physikalischer Erkenntnis aufgrund unmittelbarer Beobachtung, sowie die Tragfähigkeit der Inhalte [Erb94, 11ff]. Speziell auf die Quantenphysik bezogene "Leitziele" für den Oberstufenteil des Curriculums hat Werner in seiner Arbeit formuliert [Wer00, 23ff]. Diese Leitziele sind gewissermaßen das Ergebnis eines eklektizistischen Vorgehens und treten an die Stelle einer geschlossenen didaktischen Theorie.

Physikalische Theorie und Curriculumkonstruktion

Im Mittelpunkt des zweiten Curriculum-Bausteins steht das Fermat-Prinzip. Die Aussage dieses Extremalprinzips – das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es, im Vergleich zu denkbaren Nachbarwegen, die kürzeste Zeit benötigt – ermöglicht eine einheitliche Deutung der geometrischen Optik (vgl. Abbildung 13.1 auf der nächsten Seite). Durch die im Laufe der Unterrichtseinheit zunehmende Erklärungsmächtigkeit des Fermat-Prinzips sollen die Zusammenhänge zwischen den Phänomenen für den Schüler besser erfahrbar werden als bei der üblicherweise verwendeten Beschreibung der Phänomene mit Hilfe mehrerer eher unverbundener Gesetze (Reflexionsgesetz, Brechungsgesetz, Abbildungsgleichung).

Diese Eigenschaft macht das Fermat-Prinzip nicht nur zu einem Unterrichtsgegenstand, an dem sich nicht nur ein grundlegender Aspekt physikalischen Denkens – das Suchen nach allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten – verdeutlichen lässt, sondern stellt auch einen im Sinne unserer Leitziele tragfähigen Inhalt dar: Eine Regel die immer wieder auf fast alle verschiedenen Fragestellungen der geometrischen Optik angewendet werden kann. Das bloße Lernen einer solchen Regel wird im allgemeinen nicht reichen, sie muss von den Schülern verstanden werden; durch das Verstehen erübrigt sich aber das Lernen isolierter Fakten und Gesetze.

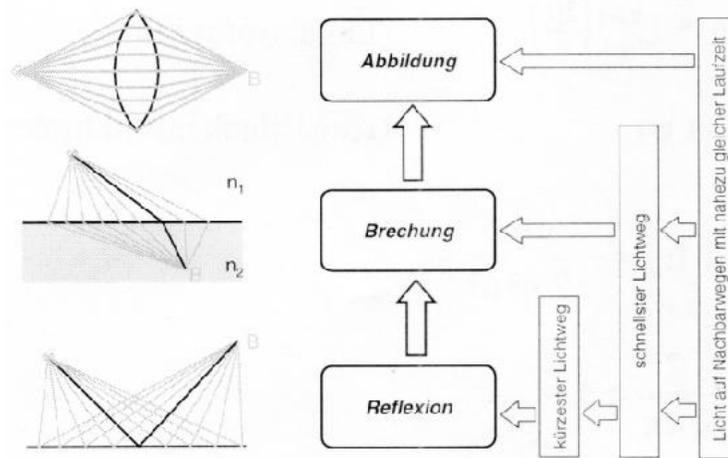


Abbildung 13.1: Inhaltliche Struktur der geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip und die darauf aufbauende vertikale Vernetzung von Unterrichtsinhalten. Die in aufeinanderfolgenden Unterrichtsschritten zu erarbeitenden Formulierungen (ganz rechts in Stichpunkten) nehmen an Abstraktion und Allgemeingültigkeit zu. Die zuletzt eingeführte Formulierung des Fermat-Prinzips – Das Licht nimmt solche Wege, dass das Licht auf denkbaren Nachbarwegen die gleiche Laufzeit hat – ist für alle Phänomene gleichermaßen richtig.

Auf das Lichtstrahlmodell, dessen Gültigkeit auf die geometrische Optik beschränkt ist, wird in dieser Unterrichtseinheit weitgehend verzichtet. Stattdessen wird die Ausbreitung des Lichts mit Lichtwegen beschrieben, die im Oberstufenteil des Curriculums für die Einführung des Zeigerformalismus ebenfalls benötigt werden. Auf diese Weise werden auch die verschiedenen Blöcke des Curriculums miteinander vernetzt.

Durchführung fachinhaltlicher didaktischer Forschung

In diesem Schritt ist der Fachdidaktiker als Fachwissenschaftler, häufig in der gesamten Breite seiner Disziplin, gefordert. Die physikalische Theorie muss schülergerecht dargestellt werden, ohne dass sie dabei falsch wird und sie muss so strukturiert werden, dass sie in einem Unterrichtsablauf erlernbar ist [Erb94, 105ff]; ferner sind in der Regel neue Experimente aufzubauen und zu erproben, für unser Curriculum beispielsweise der aufblasbare Spiegel [Sch84], das Doppelschattenexperiment [WS00], die Schusterkugel [ES91] die hyperbolische Troglinse [Erb94, 70ff], das Loch in der Seifenblase [Web99] und vieles andere mehr. Schließlich muss geeignetes Arbeitsmaterial zusammengestellt werden, z.B. Abbildungen, historische Quellen, Übungsaufgaben etc. Bei all diesem sollten unserer Ansicht nach Überlegungen zur Verträglichkeit mit den Lehrplänen und den äußeren Lernbedingungen der Schüler noch keine wesentliche Rolle spielen. Vielmehr sehen wir die Aufgabe der Didaktik an dieser Stelle darin, der Schule neue – gegebenenfalls auch unter den gegenwärtigen Unterrichtsbedingungen "verrückt" anmutende – Ideen für den Unterricht zu liefern.

13.2.2 Evaluationsforschung am Beispiel des Optik-Curriculums

Diese Stufe stellt unseres Erachtens die wesentliche Verbindungsstelle zwischen Schule und Universität, zwischen didaktischer Forschung und Unterricht dar. Die Schule kann von neuen Konzepten und Unterrichtsmaterialien profitieren, die Universität von der Unterrichtserfahrung der Lehrkräfte. Ohne eine enge Kooperation scheint erfolgreiche Evaluationsforschung grundsätzlich nicht möglich zu sein. Unsere Evaluationsforschung des Curriculums verlief in drei Schritten, die nicht unbedingt als zeitliche Reihenfolge zu verstehen sind. Jeder dieser Schritte ist mit einer Überarbeitung des Unterrichtskonzepts verknüpft:

1. **Planung konkreter Unterrichtsstunden oder -einheiten.** Aufbauend auf dem durch die fachinhaltliche didaktische Forschung zur Verfügung gestellten Unterrichtsmaterial wird der Unterricht nun im Detail und mit Blick auf die spezielle Lernsituation einzelner Schülergruppen geplant. Ergebnis dieser Arbeit sind zunächst einzelne Stundenverläufe, Arbeitsblätter, Experimentieranleitungen u.a., die später als Handreichungen für den Unterricht zusammengestellt werden können und so für weitere Schulen erreichbar werden [WS00] [Wer00, 109ff]. Schon während der Planungsphase sollte die Diskussion mit den unmittelbar am Unterrichtsprojekt beteiligten Lehrkräften im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen erweitert werden.
2. **Durchführung des Unterrichts.** Alle drei Abschnitte des Curriculums sind in unterschiedlichem Umfang erprobt worden: Bereits im Schuljahr 1989/90 wurde das Curriculum vom "Sehen zur Optik" zum ersten Mal, bis heute weitere 4 mal unterrichtet, die "Geometrische Optik nach dem Fermat-Prinzip" insgesamt 7 mal und die Zeigeroptik nach Feynman 6 mal. Zu einer besonders wirksamen Kooperation kam es immer dann, wenn sowohl die am Projekt beteiligten Lehrer als auch die Fachdidaktiker Unterricht in eigenen Lerngruppen parallel durchführen und dabei wechselseitig hospitieren.
3. **Evaluation des Unterrichts.** In den mit der Erprobung des Optikcurriculums verbundenen Studien ging es weitgehend darum, die Durchführbarkeit der Unterrichtsplanung und die Erreichbarkeit der Zielsetzungen zu prüfen, durch den Unterricht möglicherweise hervorgerufene Verständnisschwierigkeiten und Fehlvorstellungen aufzudecken, Anhaltspunkte zur Akzeptanz des Konzepts bei Schülern und Lehrern zu gewinnen, sowie die Unterrichtseinheiten an die Voraussetzungen und Lernschwierigkeiten der Schüler anzupassen. In jedem Fall ist die Evaluation ausschließlich auf das Unterrichtskonzept selbst bezogen und nicht mit Fragestellungen zu einer außerhalb des Curriculums stehenden theoretischen Grundlage verknüpft. Beispiele für Evaluationsstudien in diesem Sinne finden sich bei Erb [Erb94], Heinzerling [Hei95], Hoglebe [Hog96], Schön und Werner [SW99], Schön und Weber [SW00] sowie Werner [Wer00].

Methodisch haben wir auf der Stufe der Evaluationsforschung bewusst auf ein langfristig angelegtes Untersuchungsdesign verzichtet und bevorzugt Erhebungsinstrumente eingesetzt, die in der Schule ohnehin vorhanden sind, z.B. Lernzielkontrollen und Klassenarbeiten, Erfahrungsberichte der Lehrer sowie gemeinsame Reflexionen der beobachteten Unterrichtsstunden, aber auch Concept mapping. Nähe zur Schulrealität und Einbindung der Unterrichtscompetenz der Lehrer haben hier Vorrang vor wissenschaftlicher Präzision und vor Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse.

An zwei Beispielen soll hier verdeutlicht werden, was wir unter Ergebnissen der Evaluation im Rahmen unserer curricularen Forschung verstehen:

(1) In einer Erprobung des Unterrichts zur geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip wurde unter anderem der Frage nachgegangen, ob die Tragfähigkeit der Inhalte im Unterricht wirksam wird und – damit zusammenhängend – ob sich die Allgemeingültigkeit der Inhalte im Wissen der Schüler niederschlägt.

Abbildung 13.2 auf der nächsten Seite zeigt die Auswertung einer Aufgabe zur optischen Abbildung durch eine Sammellinse in der Klassenarbeit, die am Ende der Unterrichtsreihe geschrieben wurde: Während nur zwei bzw. sechs von 13 Schülern erfolgreich die wenige Stunden vor der Klassenarbeit eingeführten Inhalte "Abbildungsgleichung" und "Brechkraft einer Linse" anwenden konnten, griffen jeweils neun Schüler erfolgreich auf die einige Wochen früher eingeführten Inhalte "optische und geometrische Weglänge" sowie "optische Abbildung" zurück. Dies erklären wir uns damit, dass in unserem Unterrichtskonzept tragfähige Lerninhalte eingeführt und im nachfolgenden Unterricht konsequent weiter eingesetzt und vertieft wurden (siehe auch [SW00]).

(2) Abbildung 13.3 auf Seite 132 zeigt Begriffsnetze einer Schülerin, die vor Beginn und nach Abschluss unserer Unterrichtsreihe zur Optik angefertigt wurden. Der Schülerin war – wie den anderen Schülern der Lerngruppe auch – die geometrische Optik vor Beginn des Unterrichts bereits bekannt, aber nicht unter dem Blickwinkel des Fermat-Prinzips. Vor Beginn der Unterrichtseinheit hat das Begriffsnetz ausgeprägt fragmentarischen Charakter; es zerfällt in insgesamt 4 Teilnetze, deren größtes 10 Begriffe enthält, siehe oberes Begriffsnetz. Im Begriffsnetz derselben Schülerin nach Ende der Unterrichtseinheit hat sich die Zahl der Komponenten auf ein einziges Teilnetz reduziert, das alle zur Verfügung gestellten Begriffe enthält und um den zentralen Begriff "Licht" herum hierarchisch strukturiert ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich bei dieser Schülerin der allgemeingültige Charakter der vermittelten Inhalte in einer stärker zusammenhängenden Wissensstruktur niedergeschlagen hat.

13.2.3 Empirische pädagogische Forschung

Zu dieser dritten Ebene curricularer Forschung gehören neben einer zugrundeliegenden Lerntheorie auch aus dieser Theorie begründete Forschungshypothesen, die beantwortet werden

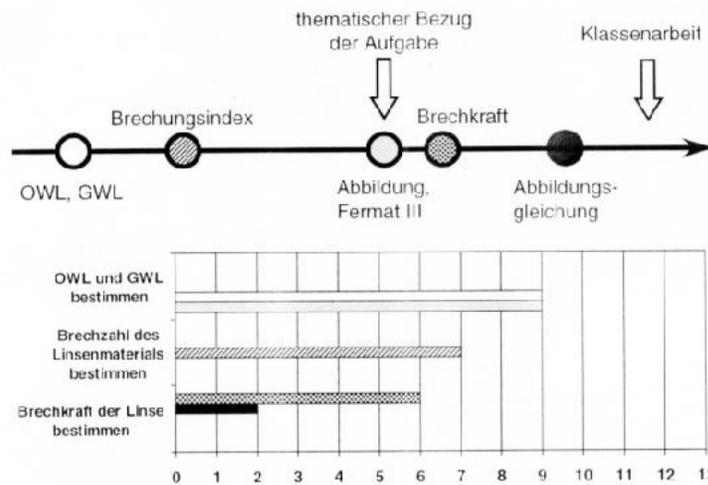


Abbildung 13.2: Auswertung einer von den Schülern bearbeiteten Aufgabe zur optischen Abbildung aus einer Klassenarbeit am Ende der Unterrichtseinheit. Auf dem Pfeil oben ist die zeitliche Verteilung der Lerninhalte im Unterricht dargestellt, die für die Lösung aller drei Teilaufgaben maßgeblich waren. Das Balkendiagramm zeigt die Zuordnung dieser fünf Lerninhalte zu den drei Teilaufgaben (Bestimmung der optischen und geometrischen Weglänge – Bestimmung der Brechzahl des Linsenmaterials – Bestimmung der Brechkraft der Linse) sowie die jeweilige Anzahl richtiger Lösungen.

sollen, die Bereitstellung eines Untersuchungsdesigns, sowie eines methodischen Instrumentariums. Wie diese Arbeitsschritte für die Forschung an unserem Optik-Curriculum aussehen, können wir an dieser Stelle nur sehr verkürzt andeuten.

Die zugrundeliegende Theorie

Ausgangspunkt unserer Überlegungen sind *Netzwerkmodelle des menschlichen Gedächtnisses*, in denen angenommen wird, dass menschliche Erfahrungen und menschliches Wissen in kognitiven Schemata repräsentiert werden, die thematisch zusammengehörige Teilsysteme eines solchen Netzwerks darstellen (vgl. u.a. Rumelhart und Norman [RN78], sowie Mandl, Friedrich und Hron [MFH94]). Die Qualität der Wissensbasis wird demnach durch den Umfang und die interne Organisation der Schemata, ihre Vernetzung untereinander und mit unterschiedlichen Anwendungssituationen bestimmt [Bun97].

Lernprozesse, in denen die Schüler eine in diesem Sinne gut organisierte Wissensbasis erwerben können, bezeichnen wir in Anlehnung an den Sprachgebrauch neuerer Publikationen von Baumert [Bau98], Baumert, Bos und Watermann [BBW98], Baumert, Lehmann et al. [BL97] sowie Weinert und Helmke [WH93] als kumulativ. Darüber hinaus lassen sich kumulative Lernprozesse noch durch weitere Merkmale wie die langfristige Wirksamkeit des Gelernten, einen "Mitnahmeeffekt", der den Schülern ersichtlich macht, dass sich die vorangegangenen Lernanstrengungen gelohnt haben, eine zunehmende Selbstwirksamkeitserwartung, sowie Veränderungen in der Wissensbasis durch Aufbau- und Differenzierungsprozesse charakterisieren.

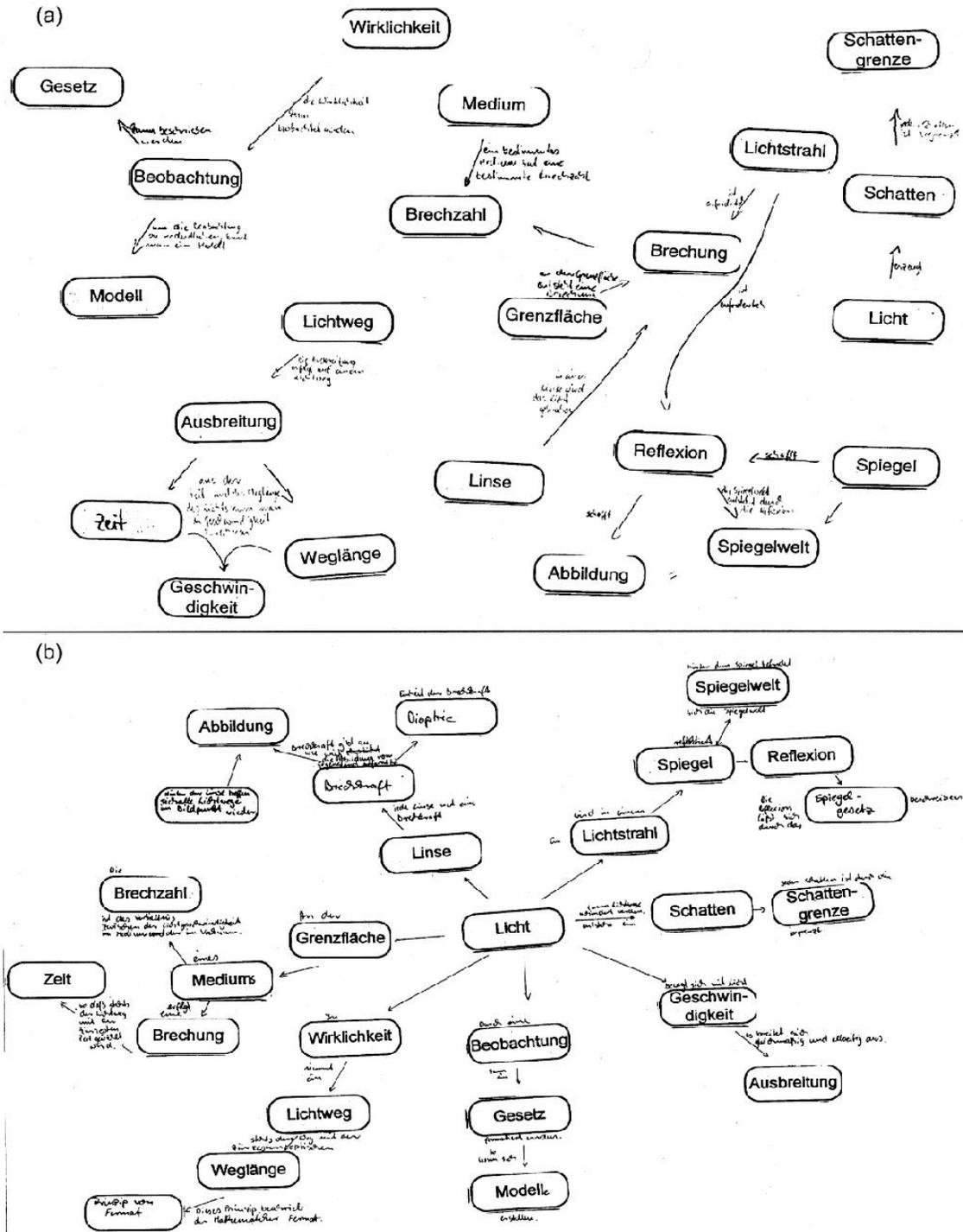


Abbildung 13.3: Aus Begriffen zur geometrischen Optik gelegtes Concept map einer Schülerin vor Beginn der Unterrichtsreihe (a) und nach deren Abschluss (b).

Harms und Bündler [HB99] haben theoretische Zusammenhänge zwischen der Sequenzierung von Lerninhalten in einem Curriculum und dem Auftreten kumulativer Lernprozesse aufgezeigt. Da unser Curriculum große Übereinstimmungen mit dem von den Autoren vorgestellten "an Leitfragen orientierten Curriculum" aufweist, sollte es besonders geeignet sein, kumulative Lernprozesse zu fördern.

Forschungshypothese

Am Beispiel unseres Optikcurriculums soll geprüft werden, ob sich der vermutete Zusammenhang zwischen einer vertikal vernetzten Anordnung der Lerninhalte und kumulativen Lernprozessen tatsächlich nachweisen lässt. Dabei sollen unter anderem durch Concept mapping gemessene strukturelle Veränderungen in der Wissensbasis als Indikator für kumulative Lernprozesse genommen werden. Eine unserer Hypothesen lautet also:

Nach vertikal vernetztem Unterricht konstruieren die Schüler Begriffsnetze größerer (struktureller) Güte als nach konventionellem Unterricht (Kontrollgruppen).

Untersuchungsdesign und -methode

Der in Abbildung 13.4 auf der nächsten Seite dargestellte Erhebungsplan zeigt die Interventionen und Meßzeitpunkte. Die als "Block I" bezeichnete, acht bis zwölf Wochen dauernde Intervention umfasst jeweils eine vollständige Unterrichtseinheit, die als "Block II" bezeichnete Intervention eine kurze, zwei bis vier Stunden dauernde Unterrichtssequenz, in der ein auf den Inhalten von Block I aufbauendes Problem erarbeitet wird. In den Tests 1 bis 4 wurden von allen Schülern Begriffsnetze zur Optik angefertigt, die Aufschluss über die Struktur der Wissensbasis geben sollten. In unserem Verfahren waren die Begriffe vorgegeben, Begriffspositionen und Relationen frei wählbar.

Um einen von den Schülergruppen und Interventionen möglichst unabhängigen Vergleichsmaßstab für die Bewertung der Begriffsnetze zu gewinnen, ließen wir die Concept mapping-Aufgabe zusätzlich von etwa 20 Experten – Hochschuldozenten, Lehrer, Studenten – durchführen. Aus den einzelnen Expertenmaps wurde anschließend ein Modalnetz (Mittelwertnetz) gebildet.

Bei der Verwendung des Concept mapping als Erhebungsinstrument zur Gewinnung von Daten über die Wissensstruktur der Schüler, beziehen wir uns auf eine Reihe anderer Untersuchungen und verwenden die dort entwickelten Verfahren der Interpretation (Wilson, [Wil94], Friege und Lind [FL00]).

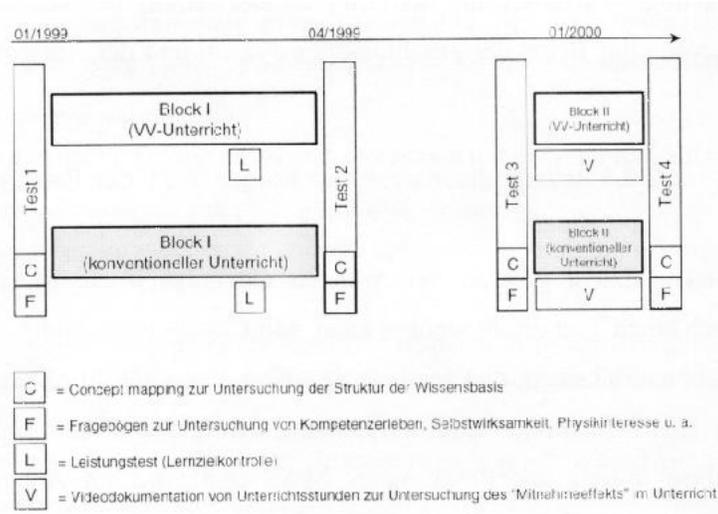


Abbildung 13.4: Design unserer empirischen Untersuchung.

Ergebnisse der empirischen Untersuchung

Da die Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, liegen für den dritten und den vierten Meßzeitpunkt noch keine vollständigen Datensätze vor. Die bisherigen Ergebnisse zeigen dennoch bereits eine deutliche Tendenz.

Als verhältnismäßig unspezifisches Maß für die Struktur der einzelnen Schülernetze wurde zunächst die jeweilige Ähnlichkeit zum Modalnetz der Expertengruppe nach DICE [Wil94] bestimmt. Während sich in der Kontrollgruppe im Laufe der Intervention des Blocks I keine signifikante Veränderung der mittleren Ähnlichkeit ergab, kam es in der Kontrollgruppe im gleichen Zeitraum zu einem signifikanten Anstieg der Ähnlichkeit ($p < 0,01$; $n = 20$); die ansteigende Tendenz setzte sich sogar in dem interventionsfreien Zeitraum zwischen den Meßzeitpunkten 2 und 3 fort (vgl. Abbildung 13.5).

Weiterhin wurden sowohl für die Untersuchungs- und Kontrollgruppe als auch für die Einzelnetze der Expertengruppe die von Friege und Lind [FL00] diskutierten Strukturparameter gemessen. Abbildung 13.6 auf Seite 136 zeigt, dass im Laufe der Intervention in der

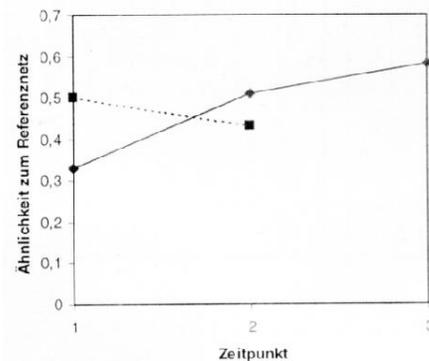


Abbildung 13.5: Mittlere Ähnlichkeiten nach DICE zwischen den Einzelnetzen der Schüler und dem Modalnetz der Expertengruppe; durchgezogene Linie: Untersuchungsgruppe, unterbrochene Linie: Kontrollgruppe.

Untersuchungsgruppe im Vergleich zur Expertengruppe für vier der fünf gemessenen Größen eine signifikante Verbesserung der Netzstruktur stattgefunden hat. Eine Varianzanalyse ergab für diese vier Parameter eine signifikante Interaktion zwischen Untersuchungs- und Kontrollgruppe ($p < 0,01$).

13.3 Schluss

Dieser Beitrag versteht sich als Versuch, anhand einiger Arbeiten an einem mehrere Schulstufen übergreifenden Curriculum aufzuzeigen, dass solche Arbeiten Forschungen auf sehr unterschiedlichen Ebenen erforderlich machen. Jede Forschungsaktivität für sich wird wenig zur Verbesserung des naturwissenschaftlichen Unterrichts beitragen. Wir sind der Überzeugung, dass erst das aufeinander abgestimmte und inhaltlich aufeinander bezogene Zusammenspiel solcher Forschungen, empirisch begründete Alternativen zur gegenwärtigen Praxis bereitstellen kann. Dennoch ist uns bewusst, dass der Weg in die alltägliche Schulpraxis noch sehr weit ist.

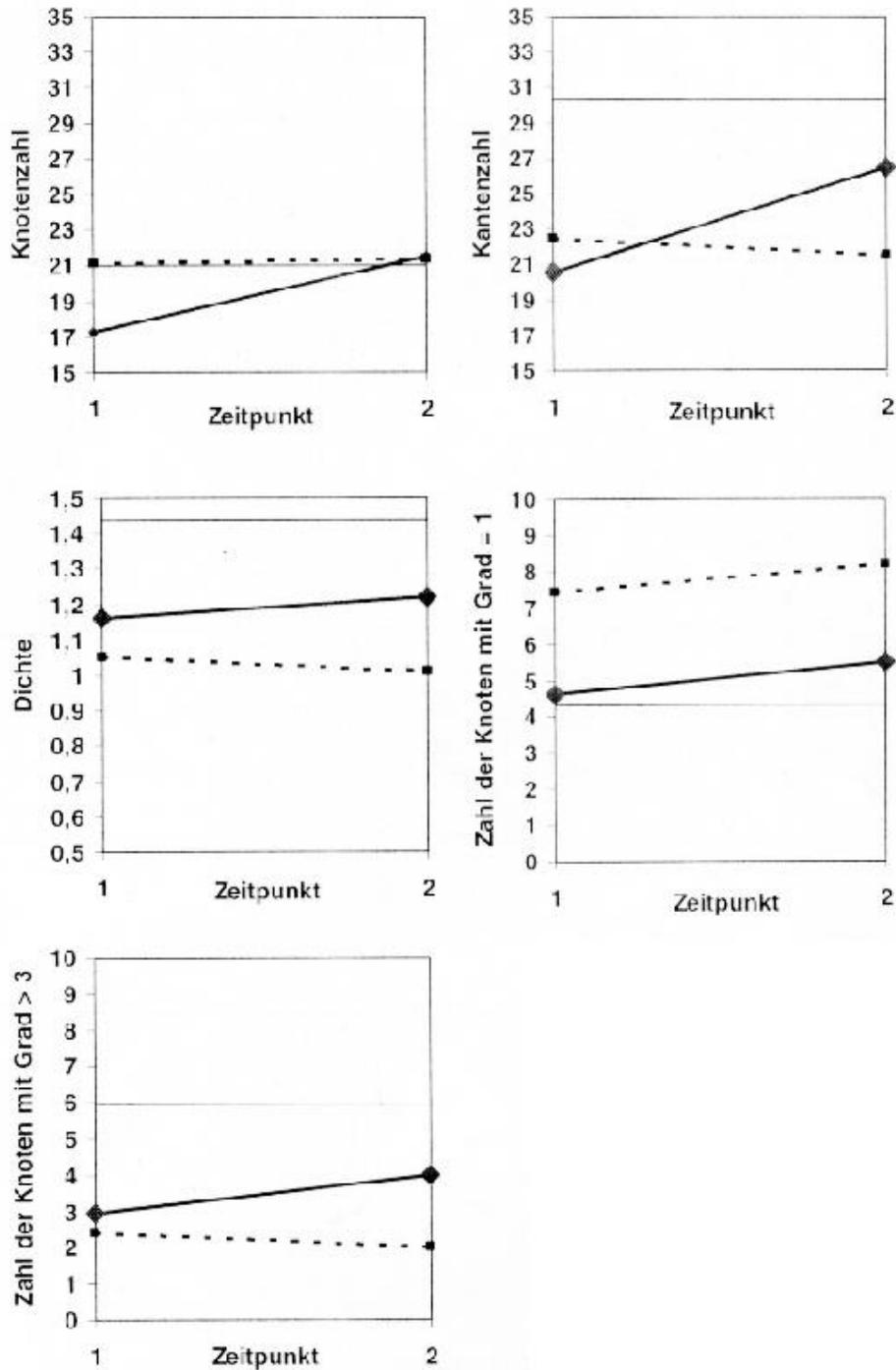


Abbildung 13.6: Strukturelle Merkmale der Einzelnetze der Untersuchungsgruppe (dickere durchgezogene Linie), der Kontrollgruppe (unterbrochene Linie) und der Expertengruppe (dünne durchgezogene Linie); das Expertenniveau wurde nur einmal gemessen und über die Zeit unverändert dargestellt.

Literaturverzeichnis

- [Bau98] BAUMERT, J.: Physikleistungen am Ende der Schullaufbahn im inter- und intranationalen Vergleich. In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT: FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Tagungsband*, 1998, S. 22–32
- [BBW98] BAUMERT, J. ; BOS, W. ; WATERMANN, R.: TIMSS/III – Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich – Zusammenfassung deskriptiver Ergebnisse. In: *Studien und Berichte H.64*. Berlin : Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, 1998
- [BL97] BAUMERT, J. ; LEHMANN, R.: *TIMMS – Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: Deskriptive Befunde*. Opladen : Leske + Budrich, 1997
- [Bun97] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1997 . – In: *Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung*, H. 60
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES91] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Die Schusterkugel. In: WIEBEL, K.H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge auf der GDGP-Tagung in Weingarten 1990* Bd. 10. Alsbach : Leuchtturm, 1991, S. 291–293
- [ES95] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Lichtwege – zentrales Element unseres Optik-Lehrganges. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge 1994* Bd. 14. Alsbach : Leuchtturm, 1995, S. 224–246
- [ES96] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittelstufe. In: *PdN-Physik* 45 (1996), Nr. 8, S. 31–36
- [FL00] FRIEGE, G. ; LIND, G.: Begriffsnetze und Expertise. In: FISCHLER, H. (Hrsg.) ; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Berlin : Logos-Verlag, 2000
- [HB99] HARMS, U. ; BÜNDER, W. *Zuwachs von Kompetenz erfahrbar machen: Kumulatives Lernen*. 1999
- [Hei95] HEINZERLING, H.: Vom Sehen zur Optik. In: *NiU-Physik* 6 (1995), Nr. 29, S. 11–15

- [Hog96] HOGREBE, G. *Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der geometrischen Optik*. 1996
- [Jah98] JAHNKE, T.: Zur Kritik und Bedeutung der Stoffdidaktik. In: *Mathematica didactica* Bd. 21, 1998, S. 61–74
- [MFH94] MANDL, H. ; FRIEDRICH, H. F. ; HRON, A.: Psychologie des Wissenerwerbs. In: WEIDEMANN, B. (Hrsg.) ; KRAPP, A. (Hrsg.): *Pädagogische Psychologie*. Weinheim : Beltz, 1994
- [Rei95] REICHEL, H. C.: Hat die Stoffdidaktik Zukunft? In: *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik* 27 (1995), Nr. 6, S. 178–187
- [RN78] RUMELHART, D. E. ; NORMAN, D. A.: Accretion, tuning and restructuring: Three modes of learning. In: COTTON, J. W. (Hrsg.) ; KLATZKY, R. L. (Hrsg.): *Semantic factors in Cognition*. Hillsdale : Erlbaum, 1978
- [Sch84] SCHÖN, L.: Bilder am großen Spiegel – Beispiele für eine Berücksichtigung affektiver Komponenten im Physikunterricht. In: *NiU-Physik* 32 (1984), S. 429–433
- [SW99] SCHÖN, L. ; WERNER, J.: Vom Licht zum Atom. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 1999
- [SW00] SCHÖN, L. ; WEBER, T.: Das Fermat-Prinzip in der Schule. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 2000
- [Web99] WEBER, T.: Das Loch in der Seifenblase. In: *Physik in der Schule* 37 (1999), Nr. 1, S. 34–36
- [Wer00] WERNER, J.: *Vom Licht zum Atom: Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*. Berlin : Logos-Verlag, 2000. – Dissertation
- [WH93] WEINERT, F. ; HELMKE, A.: Wie bereichsspezifisch verläuft die kognitive Entwicklung? In: DUIT, R. (Hrsg.) ; GRÄBER, W. (Hrsg.): *Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften*. Kiel : IPN, 1993
- [Wil94] WILSON, J. M.: Network Representations of Knowledge about Chemical Equilibrium: Variations with Achievement. In: *Journal of Research in Science Teaching* 31 (1994), Nr. 10, S. 1133–1147
- [WS00] WEBER, T. ; SCHÖN, L.-H.: Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz: Vorschläge zum Anfangsunterricht. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 60 (2000), Nr. 11, S. 30–36

Veröffentlichung 14

Sehen – Fermat – Zeiger Curriculare Forschung am Beispiel Optik

Lutz Schön, Thomas Weber, Johannes Werner

(aus: R. Brechel (Hrsg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik und Chemie in München, September 1999.* Alsbach : Leuchtturm. 1999)

Vorbemerkung

Das auf der Tagung vorgestellte Poster hatte das Ziel, am Beispiel unserer curricularen Forschung im Bereich Optik deutlich zu machen, dass fachdidaktische Forschung mindestens drei Ebenen hat.

I Entwicklung des Curriculums

Die Entwicklung neuer Unterrichtseinheiten oder ganzer Curricula erfordert eine intensive Aufarbeitung der physikalischen Inhalte. Es sind nicht nur die üblichen Lehrplan- und/oder Lehrbuchinhalte kritisch zu sichten, sondern die physikalischen Fakten des zugehörigen Gebietes sind daraufhin zu analysieren, ob und gegebenenfalls wie sie zum Inhalt von Unterricht werden sollten bzw. könnten. Bei "neuen" Inhalten sind dann sinnvolle Elementarisierungen zu erarbeiten und geeignete Experimente zu entwickeln. Wir wollen diese Ebene die Ebene der **fachinhaltlichen didaktischen Forschung** nennen.

Nicht nur für Physiker (bzw. Chemiker) sondern auch für den Didaktiker ist es ganz selbstverständlich und keiner Rückversicherung bedürftig, dass die Lerninhalte in eine sinnhafte und logische Struktur, nämlich in die Struktur des Faches eingebettet sind. Damit bildet das Fach die sichere Basis der Arbeit. Anders aber als in der physikalischen Forschung, in der durch die Entdeckung, Präzisierung oder Erweiterung physikalischer Sachverhalte die physikalische Theorie bestätigt oder verändert wird, ist in der *fachinhaltlichen didaktischen Forschung* nicht die physikalische Theorie das Ziel der Forschung, sondern das Lehren dieser Theorie. Unter der wissenschaftstheoretischen Prämisse, dass Forschung nur im Rahmen einer vorgängigen Theorie möglich ist, die durch jene modifiziert wird, muss auch *fachinhaltliche fachdidaktische Forschung* auf eine eigene Theorie bezogen sein; diese Theorie muss offengelegt werden können. Hier gibt es u.E. ein Defizit, das durch die Angabe von Bildungszielen des Physikunterrichts, also durch normative Aussagen über einen "guten", "richtigen", "zeitgemäßen", "bildungsrelevanten" o.ä. Physikunterricht noch nicht ausreichend behoben ist.

II Evaluation des Curriculums

Neue Unterrichtseinheiten und Curricula können nur dann wirksam in der Praxis werden, wenn sie in engem Kontakt mit der Schule entwickelt werden. In einer ersten Stufe ist zu prüfen, ob die Inhalte überhaupt lehrbar sind, ob also die Schülerinnen und Schüler bereit und in der Lage sind, dem entsprechenden Unterricht zu folgen und den Inhalt aufzunehmen. Erst in einer zweiten Stufe muss dann die fachliche und pädagogische Einbettung in die Ziele und Aufgaben des Physikunterrichts auf der jeweiligen Schulstufe überprüft werden. Diese Forschungsebene bezeichnen wir als **Evaluationsforschung**.

Das Kriterium der erfolgreichen Curriculumsentwicklung ist der Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler, der mit den gängigen statistischen Methoden auf die Inhalte des Curriculums bzw. auf methodische Varianten zurückgeführt werden kann. Messbarer Lernzuwachs und Statistik bilden den theoretischen Rahmen dieser Form fachdidaktischer Forschung.

III Empirische pädagogische Forschungen am Curriculum

Der Prozess des Lernens, die Entwicklung oder Konstruktion einer kognitiven Struktur "im Kopf" des Lernenden, ist ein höchst komplexer Prozess. Sobald der Lernprozess in einzelne Schritte, Elemente usw. zerlegt wird, entsteht eine Theorie der Verknüpfung, der Abhängigkeiten und Rangfolgen dieser Elemente, es entsteht eine "Theorie des Lernens", z.B. der Konstruktivismus. Der real beobachtete Lernfortschritt (hier von Physik) kann diese Theorie stützen oder ihr widersprechen. Fachdidaktische Forschung kann und sollte hier ihren "domänenspezifischen" Beitrag leisten: An konkreten physikalischen Inhalten wird überprüft, ob die zugrunde gelegte "Lerntheorie" gestützt werden kann. Die dritte Ebene fachdidaktischer

Forschung ist also **fachspezifische** ("domänenspezifische") **empirische pädagogische Forschung**.

14.1 Legitimation und Wege fachdidaktischer Forschung

Fachdidaktische Arbeiten haben ihren Ursprung i.a. in einer Unzufriedenheit mit dem Ergebnis des Unterrichts. Implizite Evaluation der Praxis bildet die Basis für zahllose Vorschläge zur Verbesserung des Unterrichts. Schul- und länderübergreifende Leistungsvergleiche wie die TIMS-Studien [BL97] und die in Planung befindliche Studie PISA [PIS] sowie zahlreiche Motivationsuntersuchungen machen dieses Unbehagen explizit. Der Widerspruch zwischen Anspruch und Wirklichkeit des naturwissenschaftlichen Unterrichts bildet mithin die Legitimation der entsprechenden Fachdidaktik.

Die hier als *Evaluationsforschung* bezeichnete Forschung ist daher i.a. der Ausgangspunkt fachdidaktischer Arbeiten. Es ist evident, dass für eine Veränderung der Praxis auf der Ebene I, der *fachinhaltlichen didaktischen Forschung*, gearbeitet werden muss, wobei das Defizit des fehlenden theoretischen Hintergrunds häufig nicht wahrgenommen wird.

Nicht nur die Ähnlichkeit der Probleme des Lehrens in den unterschiedlichen Fächern, sondern auch die Erfahrungen der empirischen pädagogischen Forschung und deren gesichertes Methodenreservoir machen empirische pädagogische Arbeiten in der Fachdidaktik (Ebene III) notwendig. Ohne die Zielsetzung fachdidaktischer Arbeiten – die Verbesserung des konkreten Fachunterrichts – aus dem Blick zu verlieren, sollten Fachdidaktiker ihren *domänenspezifischen* Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Lehrens und Lernens leisten.

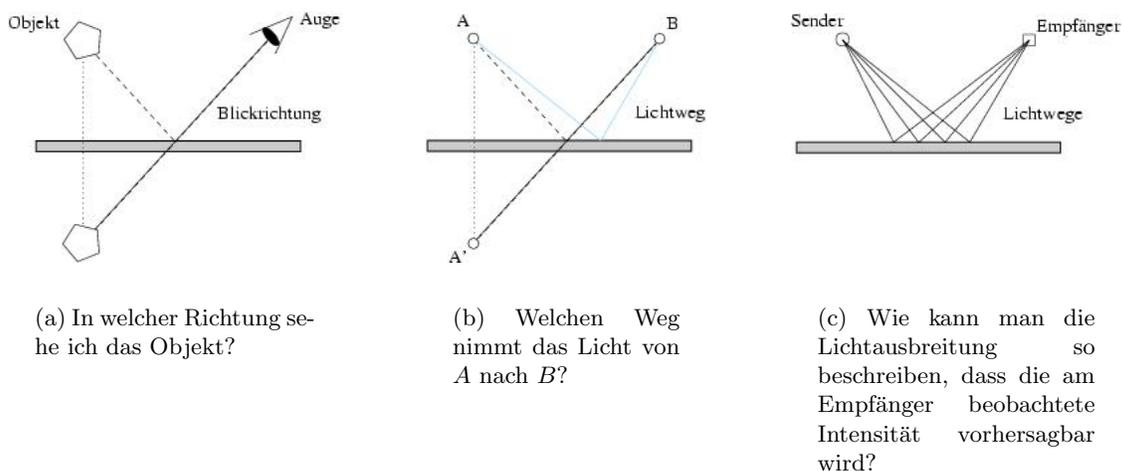


Abbildung 14.1: Aufbau unseres Curriculums an einem Beispiel

14.2 Fachdidaktische Forschung an unserem Optik-Curriculum

Bereits mehrfach haben wir den Aufbau unseres Curriculums geschildert [ES97], das hier am Beispiel der Reflexion skizziert werden soll (Abbildung 14.1 auf der vorherigen Seite): Im Anfangsunterricht steht das Phänomen im Vordergrund und aus der Analyse des Sehens bzw. Gesehenen werden die physikalischen Begriffe erarbeitet. In der Mittelstufe wird die geometrische Optik aus dem Fermatprinzip entwickelt, wobei auf den Begriff des Lichtweges zurückgegriffen und dieser weiter ausdifferenziert wird. Feynmans populärwissenschaftliche Formulierung der QED bildet die Grundlage der Optik in der Oberstufe; auch hier wird der Begriff Lichtweg weiter ausgeschärft. Es ist evident, dass für diese Curriculumentwicklung intensive fachinhaltliche Untersuchungen (Ebene I) nötig sind.

Der umfangreichen unterrichtlichen Erprobung (Ebene II) folgen intensive empirische pädagogische Untersuchungen, die insbesondere den vertikal vernetzten Aufbau des gesamten Curriculums zum Gegenstand haben (Ebene III). Zuletzt im Gutachten zum BLK-Programm SINUS [SIN] und in den Handreichungen und Erläuterungen dazu werden im Modul 5 vertikal vernetzte Unterrichtseinheiten gefordert, welche kumulative Lernprozesse begünstigen. Für unsere Untersuchungen gehen wir von folgenden Hypothesen aus (siehe auch unseren Beitrag in [SW00]):

- Nach vertikal vernetztem Unterricht konstruieren die Schülerinnen und Schüler Begriffsnetze größerer "Güte" als nach konventionellem Unterricht (Kontrollgruppen).
- Vertikal vernetzter Unterricht führt zu einem stärkeren "Mitnahmeeffekt", der sich darin äußert,
 - dass die Schüler bei Beginn eines neuen Unterrichtsabschnittes zur Optik häufiger und erfolgreicher auf altes Wissen zurückgreifen als Schüler der Kontrollgruppe
 - dass die Schüler neue Begriffe besser in ihr Wissensnetz integrieren können als Schüler der Kontrollgruppe.
- In vertikal vernetztem Unterricht erhöht sich der subjektiv erlebte Kompetenzzuwachs gegenüber dem herkömmlichen Optikunterricht und die Schüler schätzen ihre Selbstwirksamkeit höher ein.
- Nach vertikal vernetztem Unterricht stehen die Schüler dem Unterricht motivierter und interessierter gegenüber als nach herkömmlichem Unterricht.

In einem mehrstufigen Untersuchungsdesign mit entsprechenden Kontrollgruppen wird geprüft, ob sich tatsächlich die vermuteten Vorteile vertikal vernetzten Unterrichts beobachten lassen. Ein entsprechender Förderungsantrag im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms "Bildungsqualität" wurde gestellt.

14.3 Schlussbemerkung

Am Beispiel unserer Arbeiten in Berlin (und Kassel) wollten wir deutlich machen, dass sich die unterschiedlichen Inhalte, Formen und Methoden fachdidaktischer Forschung nicht gegenseitig ausschließen, sondern sich sinnvoll, ja sogar notwendig ergänzen können. Allerdings werden sich alle Ebenen fachdidaktischer Forschung nur dann an einer Hochschule durchführen lassen, wenn die Lehrstühle für Fachdidaktik entsprechend ausgebaut sind und über die Fachgrenzen hinweg kooperieren, mit Fachdidaktikern benachbarter Fächer ebenso wie mit empirisch arbeitenden Psychologen oder Pädagogen.

Literaturverzeichnis

- [BL97] BAUMERT, J. ; LEHMANN, R.: *TIMMS – Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: Deskriptive Befunde*. Obladen : Leske + Budrich, 1997
- [ES97] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: FISCHER, H.E. (Hrsg.): *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmlers Verlag, 1997
- [PIS] PISA. *Programme for International Student Assessment*. www.mpib-berlin.mpg.de/pisa/
- [SIN] *BLK-Programm "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. aktuelle Angaben und Materialien zu den Modulen: www.blk.mat.uni-bayreuth.de/blk/blk
- [SW00] SCHÖN, L. ; WEBER, T.: Das Fermat-Prinzip in der Schule. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 2000

Veröffentlichung 15

Vom Licht zum Atom

Lutz Schön, Johannes Werner

(aus: R. Brechel (Hrsg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik und Chemie in Essen, September 1998.* Alsbach : Leuchtturm. 1999)

Vorbemerkung

Das von Erb und Schön in Kassel entwickelte Lichtwegkonzept [Erb94, ES97] nutzt den Zeigerformalismus nach einer Idee R. Feynmans [Fey88] zur Beschreibung von Beugungs- und Interferenzerscheinungen. Damit lassen sich die schulrelevanten Inhalte des Optikunterrichtes der Oberstufe weitgehend abdecken. Im vergangenen Schuljahr wurde ein Teil dieses Konzeptes zusammen mit einer neu entwickelten Unterrichtseinheit mit einem Übergang zur Atomphysik erprobt.

15.1 Inhalt der Unterrichtseinheiten

Die Inhalte des Unterrichts bestanden in der Einführung des Zeigerformalismus und der Durchführung zahlreicher Interferenzexperimente. Mit dem Zeigerformalismus wurden dabei die Intensitätsverteilungen des Lichtes auf dem Beobachtungsschirm berechnet. Anhand der Beobachtung von Fotografien eines Doppelspaltbildes geringster Intensität wurde die Quanteneigenschaft des Lichtes thematisiert und der Begriff des Photons für die Registrierung von Lichtquanten eingeführt. Weiter Inhalte der Optikeinheit waren der Photoeffekt und das Fundamentalprinzip.

Die Erkenntnisse zum Licht ließen sich auf das Medium "Elektronium" übertragen. Elektronium wurde im Gegensatz zum Karlsruher Physikkurs (vgl. [Lau95]) nicht als Stoff bezeichnet, um keine klassische Materieeigenschaften nahezulegen. Elektronium verhält sich in vielem ähnlich wie Licht, so konnten beispielsweise Interferenzen beobachtet und mit dem Zeigerformalismus Antreffwahrscheinlichkeiten von Elektronen berechnet werden. Der Weg zum Atommodell wurde durch einen historischen Überblick begonnen. Der Zugang zum Orbitalmodell erfolgte über die Beschreibung des Elektroniums in einem eindimensionalen Raum (das "A-Rohr") mit Zeigern. Mit der Übertragung auf eine Kugel und unter Berücksichtigung einer potentiellen Energie aufgrund eines Coulombschen Feldes konnten die Energieniveaus des Wasserstoffatoms näherungsweise bestimmt werden. Für die Verteilung der Antreffwahrscheinlichkeit der Elektronen wurde der Begriff Orbital eingeführt. Damit bestand die Möglichkeit der Erklärung vielfältiger Wechselwirkungsprozesse zwischen Licht und Materie.

15.2 Ziele und Ergebnisse der Erprobung

Die Erprobung des Unterrichts hatte nicht die Funktion einer vergleichenden Evaluation, sondern vielmehr die einer explorativen Studie. Unterrichtet wurde in zwei Phasen von jeweils 8 Wochen (32 Schulstunden) in einem Profilkurs der Physik, Klasse 11, in einem Berliner Gymnasium. Ziel der Untersuchung war die Anpassung der Unterrichtseinheiten an die Bedürfnisse der Schulumgebung mit den speziellen Voraussetzungen und Lernschwierigkeiten der Schüler. In diesem Beitrag wird eine Analyse der Präkonzepte der Schüler zu den Themen Licht und Atom und deren Veränderungen durch den Unterricht dargestellt. Dazu wurden Lernziele formuliert, deren Erreichbarkeit untersucht wurde.

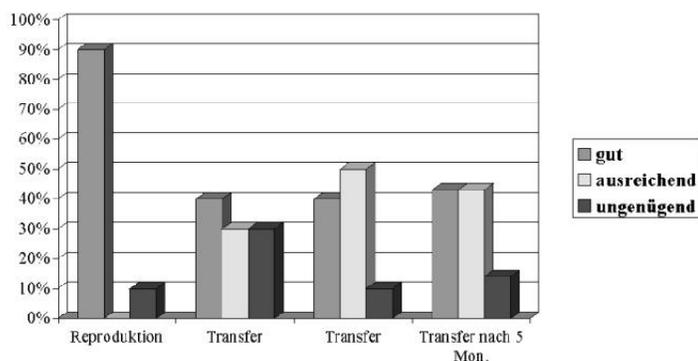


Abbildung 15.1: Fertigkeit in der Anwendung des Zeigerformalismismus

Als Untersuchungswerkzeuge standen neben einer intensiven Unterrichtsbeobachtung durch Hospitanten und Videoaufzeichnungen verschiedene Leistungstests und Concept Maps, die vor, zwischen und nach den beiden Unterrichtsphasen von den Schülern angefertigt wurden, zur Verfügung. Das letzte Map wurde durch einen Fragebogen und ein Interview ergänzt.

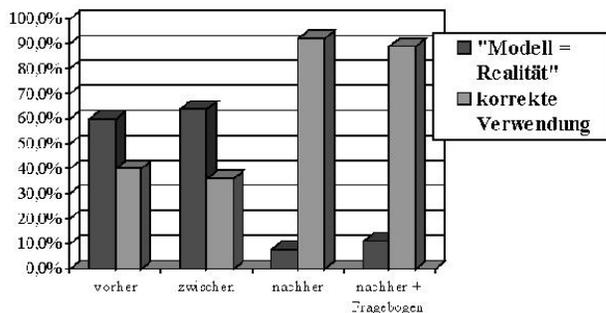


Abbildung 15.2: Verständiger Umgang mit dem Modellbegriff

sollten, mit dem Modellbegriff richtig umzugehen, wurde nach den Aussagen der Concept Maps erreicht. Während vor dem Unterricht etwa 60% der Aussagen eine Gleichsetzung von Modell und Realität wie z.B. "Licht ist eine Welle" andeuteten, wurden nach dem Unterricht die Modellbegriffe zu über 90% richtig verwendet. Dies ließ sich durch die Antworten der Fragebögen bestätigen (Abbildung 15.2). Ein drittes Lernziel, welches in dem Unterricht an zentraler Stelle stand, betrifft das Verständnis der Quanteneigenschaften von Photonen und Elektronen. Es wurde untersucht, welche Aussagen der Concept Maps im Zusammenhang mit dem Photonen- bzw. Elektronenbegriff stehen und ob ihnen eine klassische oder eine quantenmechanische Teilchenvorstellung zugrunde liegt. Aus Abbildung 15.3 ist abzulesen, dass unter allen Aussagen der Maps zwar diejenigen mit quantenmechanischen Teilchenvorstellungen zugenommen haben, dass aber andererseits die Aussagen mit klassischen Vorstellungen von den Schülern weiterhin verwendet wurden.

Um die Lernschwierigkeiten insbesondere beim Verständnis der Quanteneigenschaften zu verstehen, werden im folgenden einige Ergebnisse der Untersuchung von Schülervorstellungen aufgezeigt. Zunächst ließ sich beim Vergleich der Concept Maps der Schüler mit einem Intentionsmap eine deutliche Tendenz erkennen, dass sich die Schülerausagen denen des Intentionsmaps im Laufe des Unterrichtes anpassten. Dies ließ sich durch die Berechnung der Zentralitäten aller Begriffe ersehen: die Zentralitäten (berechnet nach dem Hoedeindex) der Begriffe in den Schülermaps vor dem Unterricht korrelieren nur schwach ($r = 0.46$) mit den Zen-

Im folgenden soll die Überprüfung dreier Lernziele aufgezeigt werden. Das Lernziel, in der Anwendung des Zeigerformalismus eine Fertigkeit zu erlangen, wurde von den Schülern weitgehend erreicht. In Abbildung 15.1 auf der vorherigen Seite sind die Bewertungen verschiedener Reproduktions- bzw. Transferaufgaben dargestellt, die in Tests, als Hausaufgabe bzw. nach einer Vergessenszeit von 5 Monaten gestellt wurden.

Auch das Ziel, dass die Schüler erlernen

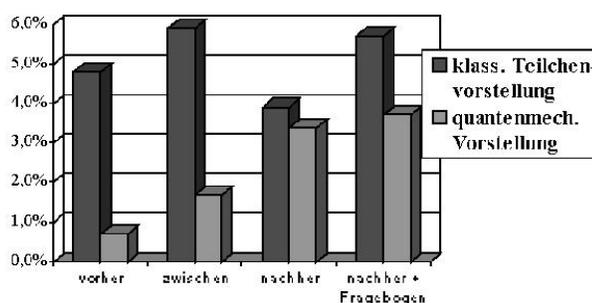


Abbildung 15.3: Verständnis der Quanteneigenschaften von Photonen und Elektronen

tralitäten der Begriffe des Intentionsmaps; nach dem Unterricht korrelieren sie jedoch stark ($r = 0.78$). Diese Anpassung geschah nicht nur dadurch, dass neue Begriffe an Bedeutung gewannen (Abbildung 15.4 (a)), sondern auch dadurch, dass vorher zentralere Begriffe unwichtiger wurden (Abbildung 15.4 (b)). In Abbildung 15.4 sind die Hoedeindizes zu einigen Begriffen der Schülermaps vor, zwischen und nach den beiden Unterrichtsphasen dargestellt (gemittelt über alle Schüler).

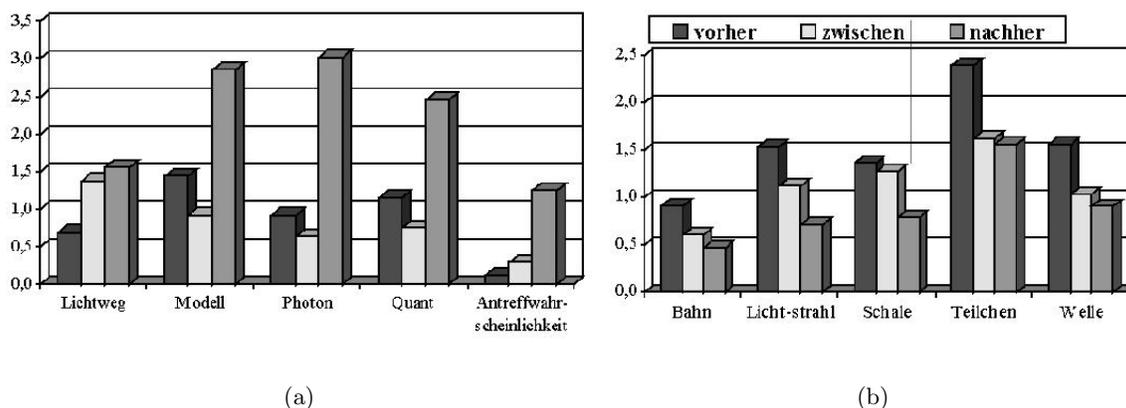


Abbildung 15.4: Bedeutungszunahme (a) und Bedeutungsabnahme (b) von Begriffen der Schülermaps

Im einzelnen ließen sich bei vielen Schülern in den Maps vor dem Unterricht Aussagen zum Licht finden wie etwa: "Licht besteht aus Strahlen", "Licht ist eine Welle" oder "Licht besteht aus Teilchen". Dagegen gaben sie hinterher an, dass Lichtstrahl und Welle Modelle vom Licht seien und dass das Photon das Quant des Lichtes sei. Allerdings haben auch viele Schüler die Vorstellung entwickelt, dass sich Photonen auf Lichtwegen bewegen, was nicht intendiert war. Vorstellungen zum Atom zeigten sich vor dem Unterricht durch Aussagen wie: "Atome besitzen Schalen", "Elektronen kreisen auf Bahnen" und "Elektronen sind Teilchen". Nach dem Unterricht zeigten sie sich verändert: "Schale/Bahn/Orbital sind Modelle vom Atom" oder "das Orbital ist Antreffwahrscheinlichkeit von Elektronen". Die Aussage "Elektronen sind Teilchen" wurde beibehalten aber durch die widersprüchlich erscheinende Aussage "Elektronen sind Quanten" ergänzt. Die Auswertung der Interviews deutet jedoch darauf hin, dass die Schüler durchaus im Sinne der Quantenmechanik richtige Vorstellungen zum Elektron entwickelt, aber den klassischen Begriff beibehalten haben.

Anhand von Einzelprofilen ließen sich bei solchen Schülern Schwierigkeiten beim Ablegen ihrer klassischen Vorstellungen beobachten, die durch früheren Unterricht oder eigenes Engagement klassische Modelle zum Licht oder Atom erlernt haben. So ließen sich bei einem guten Schüler mit detaillierten Kenntnissen zum Bohrschen Atommodell aus dem Chemieunterricht

Schwierigkeiten beim Erlernen des Orbitalmodells erkennen, die er im Bereich der Optik nicht hatte. Umgekehrt gab ein Schüler, der sich durch Eigenstudium Kenntnisse zum Wellenmodell angeeignet hatte, an, dass er den Zeigerformalismus als schwierig empfand. Er äußerte noch im Interview nach dem Unterricht die Vorstellung, dass sich Photonen auf Wellenbahnen bewegten, was er durch eine entsprechende Handbewegung illustrierte. Alle anderen Schüler bewerteten den Zeigerformalismus als recht einfach., Aufgrund dieser Einzelfallstudien ließ sich die Beobachtung (z.B. [Fis92]), dass insbesondere beim Erlernen quantenmechanischer Modelle Vorkenntnisse entsprechender klassischer Modelle hinderlich sind, stützen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden bei der Überarbeitung der Unterrichtseinheiten Berücksichtigung finden. Das entstandene Unterrichtskonzept, über die Optik mit Zeigern in die Atomphysik einzusteigen, erscheint uns damit als ein geeigneter Zugang in die Quantenphysik, bei der Inhalte der modernen Physik auf verständliche Weise vermittelt werden können.

Literaturverzeichnis

- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES97] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: FISCHER, H.E. (Hrsg.): *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmers Verlag, 1997
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Fis92] FISCHLER, H. (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*. Kiel : IPN, 1992
- [Lau95] LAUKENMANN, M. *Elektronen und Photonen – Ein Unterrichtsvorschlag zur Atom- und Festkörperphysik für die Sekundarstufe I*. 1995

Veröffentlichung 16

Kumulatives Lernen mit dem Lichtwegkonzept

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: *Zur Didaktik der Physik und Chemie* 22, S. 351-353. Alsbach : Leuchtturm. Vortrag auf der Tagung für Didaktik der Physik und Chemie 2001 in Dortmund)

Vorbemerkung

Durch Ergebnisse der TIMS-Studien ist der von Gagné [Gag73] geprägte Begriff des kumulativen Lernens Ende der 90er Jahre erneut aktuell geworden. Ausgehend davon wird die geringe Kumulativität des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts weithin als "curriculare Problemzone" angesehen [Bun97]. Die deskriptiven Befunde von TIMSS lassen jedoch weitgehend offen, um welche Art von Lernprozessen es dabei eigentlich geht und wie ein Instruktionsdesign aussehen muss, durch das kumulatives Lernen gefördert wird.

Dementsprechend gibt es bisher kaum aktuelle Vorschläge für die Gestaltung kumulativer Lernprozesse im Physikunterricht. Harms und Bündler [HB99], sowie Hertrampf [Her99] machen Vorschläge, die sich aber auf den Mathematik-, Biologie- und Chemieunterricht beziehen. Eine empirische Prüfung, ob es mit diesen Unterrichtskonzepten tatsächlich gelingt, in verstärktem Maße kumulative Lernprozesse in Gang zu setzen, liegt bisher in keinem Fall vor.

Im Folgenden soll mit dem dem von Erb und Schön unter dem Namen "Lichtwegkonzept" entwickelten Optikcurriculum (vgl. [Sch93, ES96]) ein Unterrichtskonzept vorgestellt werden, in dem – zunächst theoretisch – eine Förderung kumulativer Lernprozesse zu erwarten ist.

16.1 Der Begriff kumulativen Lernens

Um die Kumulativität von Unterricht zu beurteilen, werden drei Kriterien zugrunde gelegt, die in der aktuellen Literatur immer wieder auftauchen (vgl. u.a. [HB99]) und sich auch für eine empirische Untersuchung kumulativen Lernens operationalisieren lassen:

- Der Aufbau einer gut organisierten Wissensbasis: Kumulatives Lernen ist nicht als additives "Dazulernen" zu verstehen, sondern zielt auf ein qualitativ angemesseneres, vertieftes Verständnis eines vorher in Umrissen bekannten Sachverhalts ab. Letzteres ist mit einer strukturellen Neuorganisation der Wissensbasis verbunden, wobei die Vernetzung und hierarchische Ordnung des begrifflichen Wissens bzw. der kognitiven Schemata als entscheidende Merkmale angesehen werden.

Zahlreiche Untersuchungen deuten darauf hin, dass sich die Strukturmerkmale der Wissensbasis durch Concept Mapping-Verfahren erfassen lassen (vgl. Fischler und Peuckert [FP00]). Dafür kommen insbesondere die anhand einfacher Strukturparameter (Kantenzahl, Knotenzahl, Dichte, Anzahl zentraler Begriffe, Anzahl einzeln vernetzter Begriffe) zu beurteilende Strukturqualität, aber auch die (strukturelle) Ähnlichkeit zu Expertenmaps oder die Position abstrakter und konkreter Begriffe im Map in Frage.

- Die Anschlussfähigkeit für nachfolgendes Lernen: Anschlussfähigkeit im Unterricht ist gleichbedeutend damit, dass bei den Lernenden sequenzieller Transfer zustande kommt, d.h. dass Dinge, die zu einem Zeitpunkt gelernt werden, Einfluss auf das Lernen zu einem späteren Zeitpunkt haben. Sequenzieller Transfer erfolgt immer in ein und demselben Kontext und ist somit domänenspezifisch.

Sequenzieller Transfer sollte sich darin bemerkbar machen, dass einmal erworbene Lerninhalte für das Weiterlernen im selben Wissensbereich genutzt werden können. Dies wäre beispielsweise daran zu erkennen, wie oft die Schülerinnen und Schüler beim Beginn eines neuen Unterrichtsabschnitts auf früher gelerntes Wissen zurückgreifen können, was sich z.B. über die Anzahl rückbezogener Äußerungen zu Beginn des neuen Unterrichtsabschnitts feststellen lässt.

- Das Erleben von Kompetenzzuwachs: Kumulativer Wissenserwerb zielt nicht nur auf Verbesserungen im kognitiven Bereich ab, sondern es wird als ebenso wichtig angesehen, dass die Schülerinnen und Schüler die Nützlichkeit ihrer fachbezogenen Kompetenzentwicklung spüren. Dies soll gerade dadurch geschehen, dass sie in kumulativ verlaufenden Lernprozessen ihr Wissen und Können Stück für Stück erweitern und vertiefen.

Das Erleben von Kompetenzzuwachs sollte sich positiv auf die subjektive Einschätzung der eigenen Fähigkeiten in dem betreffenden Wissensgebiet, aber auch auf die Beziehung zu den Lerninhalten, an denen Kompetenzzuwachs erfahren wird, auswirken. Insofern erscheint es sinnvoll, Variablen des Interesses und des fachspezifischen Selbstkonzepts als Indikatoren für das Erleben von Kompetenzzuwachs zu verwenden.

16.2 Instruktionsmassnahmen zur Förderung kumulativen Lernens

Maßnahmen, die vorgeschlagen werden, um die Kumulativität des Unterrichts zu erhöhen, beziehen sich in erster Linie auf die Anordnung der Lerninhalte. So wird eine kohärente Sequenzierung des Lehrstoffs gefordert, die durch vertikale Verknüpfungen zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden Lerninhalten hergestellt werden soll [Bun97]. Seel [See00] betont, dass nachfolgendes Lernen die Existenz assoziierbarer Anker im semantischen Gedächtnis voraussetzt. Damit kumulatives Lernen stattfinden kann, müssten solche Anker in Form von Organisierern (d.h. Begriffe oder Regeln) von außen implantiert werden.

16.3 Kumulatives Lernen und Struktur des Lichtwegkonzepts

Das Optik-Curriculum ist so angelegt, dass ein Wechsel von Modellen und Beschreibungsweisen während der gesamten Schulzeit nicht nötig ist. Im Zentrum steht auf allen Stufen des Unterrichts die räumliche Beziehung zwischen Lichtquelle, optischen Medien oder Hindernissen und einem Lichtempfänger, z.B. dem Auge des Beobachters, sowie die geometrische Beschreibung von Lichtwegen zwischen Quelle und Empfänger (vgl. auch [Mai86]). Auf diese Weise durchzieht der Begriff des Lichtwegs das gesamte Curriculum.

Im Abschnitt für die Mittelstufe, der geometrischen Optik, kommt es durch die Verwendung eines übergeordneten, verbindenden Prinzips, des Fermat-Prinzips, zu einer vertikalen Vernetzung der einzelnen Lerninhalte der geometrischen Optik (Reflexion, Brechung, Abbildung). Dieses Prinzip soll im Unterricht immer wieder aufgegriffen und dabei schrittweise genauer und umfassender formuliert werden. Auf diese Weise wird eine einheitliche Deutung der geometrischen Optik möglich (vgl. Abbildung 16.1 auf der nächsten Seite).

Der Lichtwegbegriff sowie das Fermat-Prinzip stellen "Organisierer" des Unterrichts im oben beschriebenen Sinne dar. Zugleich gewährleisten sie die geforderte vertikale Vernetzung des Lehrstoffs. Solche "Organisierer" innerhalb des Wissensbereichs "Optik" fehlen im schulüblichen Unterricht. Insgesamt weist das Lichtwegkonzept also eine *Strukturierung der Inhalte* auf, die eine verstärkte Förderung kumulativer Lernprozesse erwarten lässt.

16.4 Untersuchung kumulativen Lernens am Beispiel des Lichtwegkonzepts

Im Rahmen einer vergleichenden empirischen Untersuchung sollte geprüft werden, ob die vermuteten Zusammenhänge zwischen der Inhaltsstruktur eines Curriculums und dem Auftreten

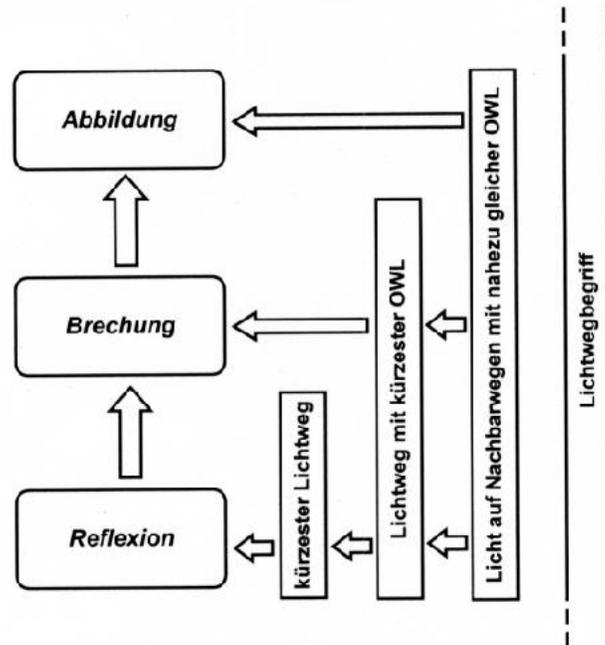


Abbildung 16.1: Inhaltliche Struktur des Abschnitts zur geometrischen Optik im Lichtwegkonzept.

kumulativer Lernprozesse nachweisbar sind. Dabei wurde das Lichtwegkonzept als Beispiel für ein Unterrichtskonzept angesehen, in dem eine stärkere Förderung kumulativer Lernprozesse zu erwarten ist als im schulüblichen Optikunterricht.

Die Durchführung der vergleichenden Untersuchung erfolgte in zwei Schritten: Zunächst erhielten eine Experimentalgruppe und eine Kontrollgruppe in der Jahrgangsstufe 10 Unterricht zur geometrischen Optik nach dem Lichtwegkonzept bzw. nach einem schulüblichen Unterrichtsgang. In einem zweiten Schritt wurde etwa ein Jahr später in der Jahrgangsstufe 11 bei denselben Schülern eine fünf Unterrichtsstunden dauernde Einführung in die Interferenzoptik unterrichtet. Begleitend wurden mit Hilfe von Fragebögen, Concept-Mapping Aufgaben und Videoaufzeichnungen Daten zur Prüfung der drei genannten Kriterien kumulativen Lernens sowie auf die Inhalte des Unterrichtskonzepts bezogene Daten erhoben.

16.5 Ausblick

Die Darstellung der Ergebnisse dieser Untersuchung ist Teil einer in Kürze abzuschließenden Dissertation. Darin wird in erster Linie der Frage nachgegangen, ob sich in einer nach dem Lichtwegkonzept unterrichteten Schülergruppe in stärkerem Maße kumulative Lernprozesse nachweisen lassen als in einer schulüblich unterrichteten Kontrollgruppe. Darüber hinaus wird untersucht, ob neben der Strukturierung der Lerninhalte auch die Auswahl der Inhalte selbst eine Rolle beim Zustandekommen kumulativer Lernprozesse spielt.

Literaturverzeichnis

- [Bun97] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1997 . – In: *Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung*, H. 60
- [ES96] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittelstufe. In: *PdN-Physik* 45 (1996), Nr. 8, S. 31–36
- [FP00] FISCHLER, H. ; PEUCKERT, J.: *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Berlin : Logos-Verlag, 2000
- [Gag73] GAGNÉ, R. M.: *Die Bedingungen menschlichen Lernens*. Hannover : Schroedel, 1973
- [HB99] HARMS, U. ; BÜNDER, W. *Zuwachs von Kompetenz erfahrbar machen: Kumulatives Lernen*. 1999
- [Her99] HERTRAMPF, M. *Erfahren von Kompetenz im Mathematikunterricht*. 1999
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [Sch93] SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992* Bd. 13. Alsbach : Leuchtturm, 1993, S. 271–273
- [See00] SEEL, N. M.: *Psychologie des Lernens*. Stuttgart : UTB, 2000

Teil V

Polarisation – Phänomenologisch

Veröffentlichung 17

Zur Phänomenologie der Polarisation

Johannes Grebe, Lutz-Helmut Schön

(aus: R. Brechel (Hrsg.) *Zur Didaktik der Physik und Chemie* 22. S. 254-256. Berlin : Leuchtturm. 2002)

Vorbemerkung

Es wird ein Ansatz zur modellfreien Beschreibung von Polarisationserscheinungen vorgestellt. Modellfrei heißt: indem man von Polarisation spricht, nicht von in der Vorstellung zugrunde gelegten Konstruktionen wie Strahlen, Teilchen oder Wellen auszugehen, die als solche keine Observablen sind, sondern zu beschreiben, was tatsächlich erscheint. Das klingt einfach, ist aber schwierig. Warum? Weil man im Aussprechen physikalischer Urteile gewohnt ist, die Erscheinungen als Folge von selbst nicht Erscheinendem zu verstehen, also z.B. die Effekte der Polarisation als durch Vorgänge mit Wellenfeldern verursacht zu denken, die sich selbst der direkten Wahrnehmung entziehen.

Weil man den konkreten Erscheinungszusammenhang eines Phänomens verlässt und das, was erscheint, zurückführt auf hypothetische Vorgänge, die einheitlichen Prinzipien gehorchen, ist man in der Lage, optische, elektrische, thermodynamische Probleme als mechanische Probleme zu formulieren. Darauf beruht die Reduktionismus genannte Urteilsform, die im 18. und 19. Jahrhundert als Instrument der klassischen Physik ausgebildet worden ist.

Demgegenüber besteht aus einer erkenntnistheoretisch motivierten, didaktischen Perspektive das Interesse, die Urteilsbildung gegenüber der Natur an die eigenen Wahrnehmungsmöglichkeiten anzuschließen, diese dadurch überhaupt zu entwickeln, zu stärken und damit das auf

selbst gemachte Erfahrungen gestützte Urteil zu fördern. Von Schülern wünschen wir uns, dass sie ihre Sinne gebrauchen können, bevor sie den Nutzen vereinheitlichender Modelle schätzen lernen.

Polarisation als Bildzustand

Von den Erscheinungen ausgehen: was heißt das gegenüber der Polarisation? Ausgangspunkt einer modellfreien Optik, wie sie von Mackensen [MO98] und Maier [Mai86] entwickelt wurde, ist die dem Gesichtssinn sich unmittelbar anbietende Ansicht der Umgebung. Im Rahmen einer so verstandenen Optik der Bilder wird der Versuch unternommen, den Polarisationszustand nicht als Eigenschaft des elektrischen Feldvektors, sondern als *Bildzustand* zu beschreiben. Im Zusammenspiel verschiedener optischer Elemente in verschiedenen Phasen (Atmosphäre, Wasserspiegel, doppelbrechende Kristalle) ergeben sich Beobachtungsbedingungen, unter denen sich charakteristische Helligkeitsänderungen der Ansicht wiederholen. Darauf und auf die Orientierung des sog. *Haidinger-Büschels*¹, dessen Beobachtung ähnlich wie die anderer Kontrastphänomene allerdings geübt werden muss, stützt sich die empirische Definition der Polarisationszustände.

Am Beispiel von vier einfachen Beobachtungen werden im Folgenden die hier gemeinten Bedingungen vorgestellt und eine empirische Definition des linearen Polarisationszustandes gegeben.

17.1 Beobachtung einer hellen Wolke im Spiegel einer Wasseroberfläche

In der Nähe, also unter steilen Aufblickswinkeln auf die Wasseroberfläche, hat man die Durchsicht auf den gehoben erscheinenden Grund des Sees; nur schwach und in Grautönen spiegelt sich der wolkeige Himmel über einem. In der Ferne dagegen, unter flachen Blickwinkeln, ist der Wasserspiegel fast ideal; das Spiegelbild des gegenüberliegenden Ufers kommt nahezu dem Original gleich. Von Einblick ins Wasser kann hier keine Rede sein. Die Wasseroberfläche ist so zweierlei zugleich: *Fenster* und *Spiegel*. Im Wechsel zwischen nah und fern tritt eines zugunsten des anderen zurück.

Während man mit dem Blick so hin- und her wandert, kann man unter einer Blickrichtung mäßiger Schräge im Spiegelbild einer hellen Wolke eine zarte gelblich-bläuliche Figur: das so-

¹Das Haidinger-Büschel beruht auf einer Netzhautreizung im Bereich des gelben Flecks, mit der das Auge auf den Anblick einer linear polarisierten Fläche antwortet. Die Büschelrichtung wird im Folgenden der Farbe entsprechend mit Gelbrichtung, die Senkrechte dazu mit Blaurichtung bezeichnet. Zur ausführlicheren Erörterung dieser Erscheinung sowie zu den Bedingungen, unter denen sie hervorgerufen werden kann, vgl. [Hai44] oder [Prö98]

genannte *Haidinger-Büschel* entdecken. Dieses Büschel zeigt sich im Spiegelbild des Himmels überall da, wo der Blick mit mäßiger Schräge auf das Wasser fällt, und es ist dabei im Mittel so orientiert, dass die Gelbrichtung senkrecht zur Wasseroberfläche steht. Weil die Richtung dieses Büschels mit dem jeweiligen Standpunkt des Beobachters verbunden ist, wird die damit verbundene Sichtbedingung *Standpunktbedingung* und das zugehörige Haidinger-Büschel *Oberflächenbüschel* genannt.

17.2 Beobachtung des Himmels

An einem wolkenlosen Tag bemerkt man zunächst, dass die Bläue des Himmels nicht überall gleich ist: Über dem Horizont, in der Nähe der Sonne und ihr gegenüber ist er heller als senkrecht zur Sonne. Indem man seinen Blick wandern lässt, gewahrt man auch hier und bevorzugt in den dunklen Zonen senkrecht zur Sonne die Erscheinung des Haidinger-Büschels. Immer dort, wo man gerade hinsieht, erscheint es in der Mitte des Gesichtsfeldes und zeigt, wenn man seine Gelbrichtung verlängert, auf die Sonne. Die Orientierung des Büschels ist offenbar mit der Himmelsumgebung, genauer: mit dem augenblicklichen Sonnenstand verbunden und ändert sich folglich mit diesem. Die hierdurch gegebene Sichtbedingung wird deshalb als *Umgebungsbedingung* und das zugehörige Haidinger-Büschel als *Atmosphärenbüschel* bezeichnet.

17.3 Beobachtung des *Atmosphärenbüschels* des Himmels im Spiegel der Wasseroberfläche

Dazu wird die Blickrichtung eingenommen, unter der sich in Beobachtung 17.1 auf der vorherigen Seite das *Oberflächenbüschel* zeigte. Man sucht dazu das Ufer des Sees auf; es möge Abend sein, die Sonne ist im Begriff unterzugehen. Senkrecht zur Blickrichtung nach der Sonne schaut man auf das Wasser. Dort zeigt sich allerdings weder das eine noch das andere Büschel. Stattdessen gewahrt man einen dunklen Fleck, einige Quadratmeter groß, eine Art Schatten: ein Loch im Spiegelbild des Himmels. Hebt man den Blick und schaut nach der Stelle am Himmel, die sich hier offenkundig der Spiegelung entzieht, so zeigt sich dort ein *Atmosphärenbüschel*, das jetzt – im Augenblick des Sonnenunterganges – eine horizontale Gelbrichtung aufweist. Indem man also versucht, dieses Büschel bzw. den entsprechenden Himmelsbereich im Spiegel des Wassers zu sehen, bezieht man die Ansichten zweier Sichtbedingungen: *Standpunkt-* und *Umgebungsbedingung*, aufeinander, die durch orthogonale Haidinger-Büschel gekennzeichnet sind – mit dem Ergebnis, dass die resultierende Ansicht *ausgelöscht* ist [Gre01].

17.4 Beobachtung mit einer Polarisationsfolie

Diese Folie ist halbtransparent und homogen. Im Durchblick zeigt sich ebenfalls ein Haidinger-Büschel und bemerkenswert ist dabei, dass die Gelbrichtung mit der Orientierung der Folie fest verbunden ist. D.h. dreht man die Folie, so dreht sich das Büschel mit. Weil die damit gegebene Sichtbedingung an einen Festkörper gebunden ist, wird sie als *Festkörperbedingung* und das zugehörige Haidinger-Büschel als *Festkörperbüschel* bezeichnet. Man wiederholt nun die Beobachtungen 17.1 auf Seite 160 und 17.2 auf der vorherigen Seite: den Schrägblick auf das Wasser und den Blick zum Himmel, indem man diese Ansichten durch die Polarisationsfolie vornimmt. Im ersten Fall stellt man damit eine Beziehung her zwischen *Festkörperbedingung* und *Standpunktbedingung* bzw. zwischen Festkörperbüschel und Oberflächenbüschel. Und man bemerkt, wie es während der Drehung der Folie um die Blickrichtung Stellungen gibt, in denen das Bild dunkel wird, also das Spiegelbild der hellen Wolke verschwindet, und solche, wo es wiederkehrt. Im Fall der *Auslöschung* sind Festkörperbüschel und Oberflächenbüschel *orthogonal*: man erhält das Dunkelbild bzw. Schatten. Im Fall der ungestörten Ansicht des Spiegelbildes der Wolke sind die Büschelrichtungen *parallel*. Zwischenstufen ergeben Zwischenhelligkeiten, die eine Funktion des zugehörigen Richtungswinkels sind.

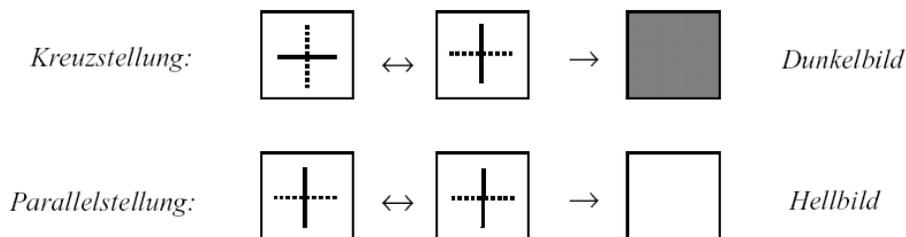


Abbildung 17.1: Dunkelbild und Hellbild bezogen auf die Büschelstellungen der jeweils beteiligten Sichtbedingungen (gepunktet: Gelbrichtung, durchgezogen: Blaurichtung).

Indem man in gleicher Weise den Himmel betrachtet, stellt man damit eine Beziehung her zwischen *Festkörperbedingung* und *Umgebungsbedingung* bzw. Festkörperbüschel und Atmosphärenbüschel. Es möge wieder Abend sein, man fixiert im Durchblick durch die Folie den Himmelsbereich senkrecht zur untergehenden Sonne, und auch hier erhält man: Abdunkelung bzw. Aufhellung der Ansicht in Abhängigkeit vom Drehwinkel der Folie um die Blickrichtung. Bezüglich der zugehörigen Büschel gilt wiederum: stehen sie *parallel*, haben wir die ungestörte Ansicht des Himmels, das *Hellbild*; stehen sie dagegen *senkrecht*, ist die Ansicht ausgelöscht, wir erhalten das *Dunkelbild* (Abbildung 17.1).

17.5 Zusammenfassung

Am Beispiel der genannten Beobachtungen ergeben sich drei Sichtbedingungen, die jeweils verbunden sind mit dem Auftreten eines Haidinger-Büschels. Es zeigt sich, dass die *Beziehungen* zwischen jeweils zwei dieser Sichtbedingungen wirksam werden können als Helligkeitsänderungen bzw. Auslöschung der Ansicht, und dass diese Helligkeitsänderung eine Funktion des Winkels zwischen den Richtungen der zugehörigen Haidinger-Büschel ist (*Malus-Gesetz*).

Zurückkommend auf die Ausgangsfrage nach einer empirischen Definition des linearen Polarisationszustandes kann diese beispielsweise folgendermaßen formuliert werden:

Ein optisches Bild heißt *linear polarisiert*, wenn es eine Polarisationsfolie und eine spezielle Orientierung derselben gibt, so dass bei dieser Orientierung das Bild vollständig abgedunkelt erscheint. Die zugeordneten Haidinger-Büschel stehen dann senkrecht zueinander, d.h. die Gelbrichtung der Folie fällt mit der Blau-Richtung des Bildes zusammen. Diese wird als *Polarisationsrichtung* P des Bildes bezeichnet.

Literaturverzeichnis

- [Gre01] GREBE, J.: Vom Polarisations Schatten. In: *MNU* (2001), Nr. 8
- [Hai44] HAIDINGER, W. K.: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. In: *Poggendorfs Annalen* 63 (1844), S. 29–39
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [MO98] v. MACKENSEN, M. ; OHLENDORF, H.-Ch.: *Modellfreie Optik*. Kassel : Pädagogische Forschungsstelle, 1998
- [Prö98] PRÖBSTL, A.: Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. In: *Elemente der Naturwissenschaften* 68 (1998), Nr. 2, S. 1–26

Veröffentlichung 18

Vom Polarisations Schatten – Eine phänomenologische Betrachtung

Johannes Grebe

(aus: *MNU* 54 (8). S. 452-454. 2001)

Vorbemerkung

Wir kennen die Entstehung von Polarisation durch Reflexion; die atmosphärische Polarisation des Himmels ist ebenfalls bekannt. Im Zusammenwirken dieser Effekte zeigt sich ein überraschendes Phänomen: der Polarisations Schatten.

18.1 Einleitung

Phänomenologisch nennen wir eine Betrachtung, wenn es gelingt, von unbefangener Naturanschauung zu exakter Beobachtung aufzusteigen, ohne jenseits der Erscheinungen Liegendes zur Erklärung heranzuziehen. Wir fragen nach Ordnungen, die im Zusammenhang der Erscheinungen selbst gegeben sind. Dabei bemerken wir, wie auf selbstgemachte Erfahrungen gestützte Urteilssicherheit entsteht. Diese wünschen wir uns bei Schülern, bevor sie die Nützlichkeit vereinheitlichender Anschauungshilfen schätzen lernen.

Die Beschäftigung mit Schatten ist so alt wie das Höhlengleichnis Platons. Der seither benannte Erscheinungsreichtum auf diesem Gebiet ist nahezu unüberschaubar. Und dennoch zeigen sich zuweilen bemerkenswerte Nuancierungen bereits bekannter Phänomene, die es wert scheinen, eigens benannt und beschrieben zu werden. Darum handelt es sich bei dem sogenannten

Polarisationsschatten. Es wird erzählt, auf welche Weise er dem Autor zum erstenmal begegnete. Die nähere Untersuchung führt dazu, den für das Auftreten dieses Schattens notwendigen Bedingungs-zusammenhang sicher aussprechen zu können. Dabei wird versucht, möglichst weitgehend mit den durch die Erscheinung selbst gegebenen Ordnungselementen zu arbeiten und auf Modelle zu verzichten.

18.2 Beobachtung gemacht am Abend des 1.5.01 am Ufer der Müggelspree

Am Ufer der Müggelspree, gegenüber von Klein-Venedig, gibt es ein Lokal mit dem klangvollen Namen "Neu Helgoland". Eine lange, direkt am Wasser gelegene Terrasse, von der sich ein herrlicher Blick über den kleinen Müggelsee auftut, macht den Ort zum beliebten Ziel für Wanderer und Radfahrer.

Wir waren nach einer längeren Radtour gegen 19 Uhr eingetroffen und hatten an einem der Tische nahe am Wasser Platz genommen. Es war ein sehr warmer Tag gewesen, der Himmel war immer noch wolkenlos, über dem Horizont zunehmend dunstig, vereinzelt Boote zogen still vorüber, ein kühler Wind kam auf.

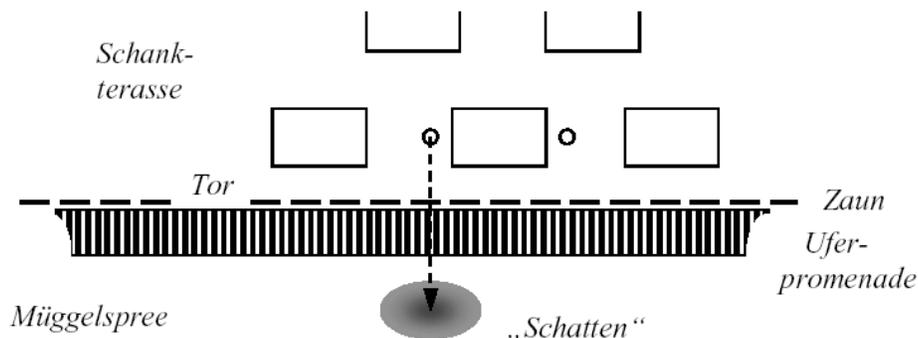


Abbildung 18.1: Draufsicht auf die Terrasse mit Uferpromenade an der Müggelspree.

Wir genossen die Aussicht auf die sinkende Sonne über dem See. Dabei wurden wir aufmerksam auf eine mehrere Quadratmeter große Verdunkelung auf der Wasseroberfläche, die sich wenige Meter entfernt auf unserer Höhe des Ufers befand und die wir zunächst für einen gewöhnlichen Schatten hielten (Abbildung 18.1).

Keiner der vereinzelt umherstehenden Bäume, noch irgendein anderer größerer Gegenstand kam jedoch bei genauerem Hinsehen als Schattengeber in Frage. Unser Interesse war geweckt: worum handelte es sich hier?

Um den "Schatten" – wenn wir so nennen durften, was noch nicht als solcher erwiesen war – aus der Nähe betrachten zu können, verließ ich unseren Tisch und trat auf die Ufer-Promenade.

Zu meiner Überraschung stellte ich aber fest, dass der "Schatten" während meines kurzen Weges keineswegs an seiner Stelle geblieben, sondern "mitgegangen" war und just da wieder auftauchte, wo ich nun hart an die Promenadenkante herantrat. Er schien der Kante näher gerückt zu sein: Mit mäßig abgespreiztem Arm, unter einem Winkel von ca. 50° , bezeichnete ich etwa die Mitte der dunklen Fläche.

Die Promenade auf und nieder wandernd versicherte ich mich meines neuen "Begleiters" und gelangte an eine Stelle, wo sich das Wasser zum glattgezogenen Spiegel beruhigt hatte. Hier bot sich die Gelegenheit, den Umriss genauer zu untersuchen, Qualität und Ausmaß der Erscheinung bewusster zu erfassen, und es zeigte sich: Dunkel war nicht eigentlich die Wasserfläche selbst; es handelte sich aber auch nicht um das Spiegelbild einer dunklen Wolke. Vielmehr schien die gespiegelte Ansicht des hellen Himmels als *Ansicht* geschwächt, abgestumpft, ausgelöscht zu sein: ein Loch im Spiegelbild des Himmels, durch das ich ins Dunkel des Wassers hineinblickte.

Nach hinten und nach den Seiten hin, d.h. für flachere Blickwinkel, ging diese Ansichtsverdunkelung durch eine breite, nach außen heller werdende Randzone in das hellblaue Spiegelbild des dunstigen Abendhimmels über. Selbst der mir zunächst liegende Rand des "Schattens" war noch im Kontrast zum gespiegelten Himmel zu sehen. Auch wenn das Spiegeln des Wassers mit steiler werdendem Blickwinkel abnahm, so war doch deutlich das Ausmaß der Verdunkelung auch gegen die schwächer gespiegelten Teile des Himmels zu erkennen. Im Ganzen bildete der "Schatten" ein parallel zum Promenadenverlauf gestrecktes Oval, das einen mittleren Durchmesser von ca. 1,5 m hatte.

Neben der durch meinen "Schrägblick" auf die Wasseroberfläche gegebenen Bedingung für das Auftreten des "Schattens" machte sich aber eine weitere, mit der *Umgebung* verbundene Bedingung geltend. Durch die Tatsache, dass überhaupt ein geschlossener Umriss gegeben war, wurde mir plötzlich die Bedeutung des Promenadenverlaufes relativ zur im Wasser gespiegelten Himmelsumgebung klar: Es musste ein ganz bestimmter Teil des Himmels sein, der sich der Spiegelung im Wasser entzog, und zwar für eine bestimmte Blickrichtung. Diese Richtung lag bisher in einer vertikalen Ebene senkrecht zum Promenadenverlauf. Um welchen Teil des Himmels handelte es sich?

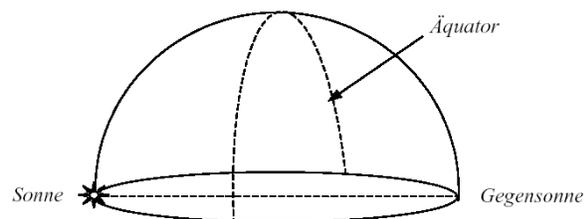


Abbildung 18.2: Halbsphäre des Himmels mit Polen und Äquator beim Sonnenuntergang.

In der Verlängerung der Promenade eine gließend goldene Straße über das Wasser legend war die Sonne soeben im Begriff unterzugehen. Sie bildete mit der sogenannten Gegen Sonne Pole

einer Halbsphäre, deren Äquator in diesem Moment senkrecht zum Promenadenverlauf und damit senkrecht zur Wasseroberfläche das Himmelsgewölbe überspannte (Abbildung 18.2 auf der vorherigen Seite).

Genau genommen war hiermit zweierlei gegeben: Der für die Auslöschung der Sicht in Frage kommende Ansichtsbereich des Himmels, der Äquatorgürtel, verlief so über das Himmelsgewölbe, dass Ausschnitte davon unter dem Schrägblick auf die Wasseroberfläche im Spiegel derselben gesehen werden konnten. Das war aber auch bei höheren Sonnenständen der Fall. Was den Augenblick des Sonnenuntergangs auszeichnete, war die besondere *Orientierung* der Halbsphäre über dem See: Sonne und Gegen Sonne standen einander am Horizont gegenüber; die Äquatorebene zu diesen Polen stand *senkrecht* auf der Ebene des Wasserspiegels.

Ein *Verhältnis* war dadurch gekennzeichnet: eine Beziehung zwischen *Standpunkt-* und *Umgebungsbedingung*, die das charakteristische Merkmal des rechten Winkels aufwies.

18.3 Erscheinungsbedingungen des Polarisationschattens

Die Überprüfung dieser Bedingungen mit Hilfe einer Polarisationsfolie, die als Analysator benutzt wurde, bestätigte, dass es sich bei dem "Schatten" um ein Polarisationsphänomen handelte. Überprüfung hieß dabei: die Art des Verhältnisses zwischen Standpunkt- und Umgebungsbedingung sich in der Beziehung des Wasserspiegels und des Himmels zu der Polarisationsfolie als vertrautem optischen Mittel jeweils wiederholen zu lassen.

Standpunktbedingung: Der Neigungswinkel des "Schrägblickes" gegen das Lot auf die Wasseroberfläche entsprach dem Winkel, unter dem das Spiegelbild vollständig linear polarisiert ist (*Brewster-Winkel* $\alpha_B = 53^\circ$ für Wasser). Das heißt: Jedem solchen "Schrägblick" unter α_B auf eine Wasseroberfläche, sei es Pfütze oder See, zeigt sich ein Spiegelbild, das sich im Durchblick durch eine Analysator-Folie bei einer bestimmten Orientierung derselben auslöschen lässt, so dass die Oberfläche zum reinen Fenster wird. Die Hauptachse der Analysator-Folie liegt in diesem Fall parallel zur Wasseroberfläche. Wenn wir die Polarisationsrichtung P der Folie senkrecht zur Hauptachse derselben definieren, dann folgt daraus, dass die Polarisationsrichtung P_\perp des Spiegelbildes im Fall der Auslöschung parallel zur Hauptachse der Folie und damit zur Wasseroberfläche liegt.

Umgebungsbedingung: Die Analysator-Folie verhält sich im Fall der Auslöschung zum Spiegelbild, wie der schräg angeblickte Wasserspiegel zu bestimmten Bereichen des Himmels. Die Untersuchung des Himmels mit der Analysator-Folie ergab, dass der Himmel polarisiert ist: an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark. Der senkrecht zur Sonne/Gegen Sonne liegende Äquatorgürtel ließ sich am stärksten abdunkeln. Hier war demnach der Polarisationsgrad am höchsten. Für kleiner werdende Winkel in Richtung Sonne/Gegen Sonne nahm die Abdunkel-

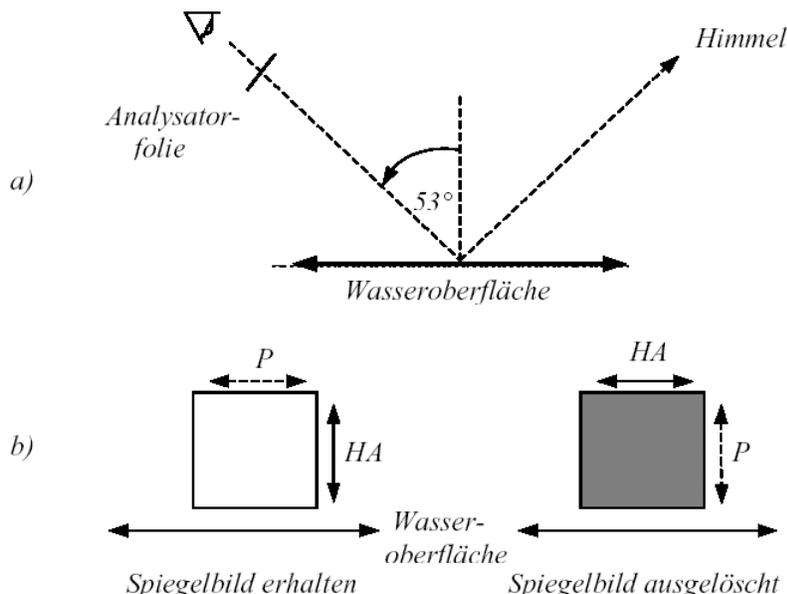


Abbildung 18.3: a): "Schrägblick" auf die Wasseroberfläche. b): Ansichten des hellen Himmels im Wasserspiegel durch eine Analysator-Folie mit horizontaler beziehungsweise vertikaler Polarisationsrichtung P, HA kennzeichnet die Hauptachsenlage der Folie.

barkeit kontinuierlich ab: die Ansicht der Gegen Sonne war schließlich vollständig unempfindlich gegenüber Drehungen der Analysator-Folie (Abbildung 18.3).¹

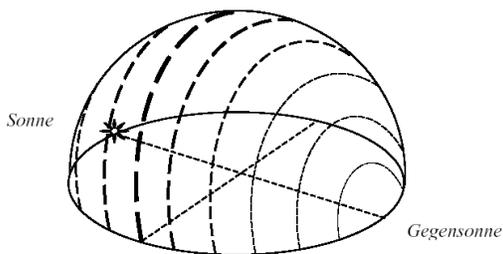


Abbildung 18.4: Halbsphäre des Himmels bei Sonnenuntergang mit Polarisationsrichtungen. Die Strichstärke entspricht dem relativen Polarisationsgrad.

Die Polarisationsrichtung erschloss sich wiederum aus der Hauptachsenlage der Analysator-Folie im Fall maximaler Abdunkelung. Es zeigte sich, dass die Hauptachse stets parallel zu Großkreisen lag, die sich in den Polen der Halbsphäre: Sonne und Gegen Sonne schnitten. Daraus ergab sich ein konzentrisch zu dieser Polachse liegendes Feld von Polarisationsrichtungen. Im Fall des Sonnenauf- bzw. -untergangs stehen diese Richtungen senkrecht auf der Horizontlinie.

Standpunktbedingung bezogen auf Umgebungsbedingung: Suchen wir im Moment des

Sonnenauf- oder -untergangs mit dem "Schrägblick" auf eine Wasseroberfläche das Spiegelbild des senkrecht zur Sonne gelegenen Himmels auf, so stehen die Polarisationsrichtung der Spiegelansicht und diejenige des im Wasserspiegel gesehenen Himmelsbereiches senkrecht auf-

¹Vergl. zur Atmosphärischen Polarisation: [Hai46, Prä98, Weh98] und [Min92, S. 333f].

einander: Das Spiegelbild ist ausgelöscht und wir blicken ins Dunkel des Wassers.

Von Schatten sprechen wir überall dort, wo Sichtbeziehungen z.B. zu einer Lampe ausgelöscht sind. Schattengeber können undurchsichtige, aber auch, wie das Beispiel der Linse zeigt, durchsichtige Gegenstände sein. Maßgeblich ist das Fehlen einer geradlinigen Sichtbeziehung, die unter anderen Umständen gegeben sein kann.

Unser "Schatten" zeigt, dass der Schattengeber auch in einer speziellen *räumlichen Beziehung* zwischen Sichtbedingungen wie den beiden hier betrachteten: Standpunkt- und Umgebungsbedingung, bestehen kann. So verstanden ist das Schattenkriterium durch die beschriebene Erscheinung erfüllt und es darf von Polarisationschatten gesprochen werden.

Anordnungen, die diesen Schatten ebenfalls zeigen, indem Beziehungen zwischen Sichtbedingungen der geschilderten Art variiert werden, sind z.B. der sogenannte *Malus-Apparat*, bestehend aus zwei Schwarzglasscheiben, ferner die *Turmalinzange* beziehungsweise das als Polarisator und Analysator bekannte Polarisationsfolien-Paar.

Literaturverzeichnis

- [Hai46] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel im geradlinig polarisiertem Lichte. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 73–87
- [Min92] MINNAERT, M. *Licht und Farbe in der Natur*. 1992
- [Prö98] PRÖBSTL, A.: Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. In: *Elemente der Naturwissenschaften* 68 (1998), Nr. 2, S. 1–26
- [Weh98] WEHNER, R.: Der Himmelskompass der Wüstenameisen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11 (1998), S. 56–67

Veröffentlichung 19

Zum Haidinger-Büschel

Johannes Grebe-Ellis

(aus: DPG (Hrsg.) *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG*. Leipzig, 2002)

Vorbemerkung

Im Kontext einer Phänomenologie der Polarisation, die Polarisationszustände als Bildzustände beschreibt, kommt dem sogenannten "Haidinger-Büschel" eine zentrale Bedeutung zu, gestattet es doch, mit bloßem Auge etwas über den Polarisationszustand verschiedener Ansichten zu erfahren. In dem Beitrag werden das Phänomen selbst und die Umstände beschrieben, unter denen es erscheint. Mit den komplexen Bedingungen, die im Auge zum Auftreten des Haidinger-Büschels als Kontrastphänomen führen, hat sich seit den Hinweisen von Helmholtz ausführlich die Ophthalmologie beschäftigt. In der Physik ist das Phänomen, das 1844 erstmals von dem Wiener Mineralogen Wilhelm Karl Haidinger beschrieben wurde, lange unbekannt geblieben, weil es sich nicht objektivieren lässt. Es wird dagegen gezeigt, dass in seinem Auftreten alle für die Polarisationsoptik charakteristischen Elemente zusammenwirken und dass sich die geometrischen Bedingungen dieses Zusammenwirkens auch objektiv anschauen lassen. Für den, der einen gewissen Übungsaufwand zu Beginn nicht scheut, kann es damit zu einem legitimen Untersuchungsmittel werden, das auf immer erneut überraschende Weise das Sehfeld bereichert.

19.1 Einleitung

Ziel einer Optik der Bilder, wie sie von Maier [Mai86, Mai81, Mai84] und Mackensen [MO98] seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde, ist die konsequente Erarbeitung

der optischen Erscheinungen aus den Ordnungen ihres Erscheinens. Darauf, diese Erscheinungen auf selbst nicht erscheinende, sondern unabhängig von der Beobachtung in der Vorstellung zugrundegelegte Vorgänge mit hypothetischen Strahlen, Teilchen oder Wellen zurückzuführen, wird bei diesem Vorgehen verzichtet. Damit wird einer Forderung entsprochen, die schon verschiedentlich [Mue48], insbesondere aber von Goethe [Goe81] gestellt wurde. Die Bedingungen der Erscheinungen werden definiert über Wege, sie herzustellen. Die Aussagen einer solchen Vorgehensweise haben deshalb die Form operationell-empirischer Axiome. Didaktisches Interesse an der methodischen Seite dieses Ansatzes besteht durch das bewusste Abstützen der Urteile auf die selbstgemachte Erfahrung, d.h. auf subjektive Versuche.

Im Rahmen dieser auch als hypothesen- bzw. modellfrei bezeichneten Optik wird vom Verfasser an der Entwicklung einer Phänomenologie der Polarisation gearbeitet [GE02, Gre01].

Von besonderer Bedeutung für eine solche Phänomenologie ist die Tatsache, dass das menschliche Auge Polarisation wahrnehmen kann. Dass dieses Vermögen in unterschiedlichen Ausprägungen bei Tieren auftritt, ist spätestens seit den beeindruckenden Untersuchungen von Frisch [Fri49] zur Bedeutung der Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen bekannt, die Ende der 40er Jahre des 20. Jahrhunderts veröffentlicht wurden. Waterman hat in einer Arbeit [Wat75] von 1975 107 polarisationssensitive Spezies aufgeführt. 36 davon – dazu gehören die Bienen – nutzen die Polarisation des blauen Himmels als eine Art "Sonnenkompass". Zu den jüngsten Arbeiten auf diesem Gebiet gehören die Untersuchungen von Wehner [Weh98] zum Polarisationssehen der *Cataglyphis bombycinus*, einer Wüstenameise der Sahara, die sich bei ihren über Hunderte von Metern durch strukturloses Gelände führenden Jagdzügen offenbar an dem mit dem augenblicklichen Sonnenstand verknüpften Polarisationsmuster des blauen Himmels orientiert.

Dem Menschen wird – zumindest was die physikalische Lehrbuchliteratur betrifft – die Fähigkeit des Polarisationssehens immer noch größtenteils abgesprochen, – aus Gründen, die verständlich sind, die sich aber bei genauerer Prüfung als unberechtigt erweisen.

Die eigentliche Erforschung des menschlichen Polarisationssehens ist, ausgehend von den bis heute wegweisenden Thesen von Helmholtz [Hel96, S. 566-572], in der Ophthalmologie erfolgt. Hier hat man sich die Fähigkeit des menschlichen Auges, beispielsweise im Durchblick durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie auf Anrieb deren kristallographische Hauptachse bzw. die Polarisationsrichtung bestimmen zu können, seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts in quantitativen Korrespondenz- und Fixationsprüfungen sowie in Untersuchungen zur Funktion der Macula zunutze gemacht [CE72, S. 376-378] und [Ale95, S. 596-603].

19.2 Das Haidinger-Büschel

Vom "menschlichen Polarisationssehen" zu sprechen ist insofern ungenau, als "Polarisation" ein Begriff ist und man Begriffe nicht sehen kann. Was man im Auge hat, wenn vom "menschlichen Polarisationssehen" die Rede ist, ist das sogenannte Haidinger-Büschel, eine zarte, gelb-violette und symmetrische Figur, mit der das Auge auf den Anblick einer linear polarisierten Fläche antwortet.

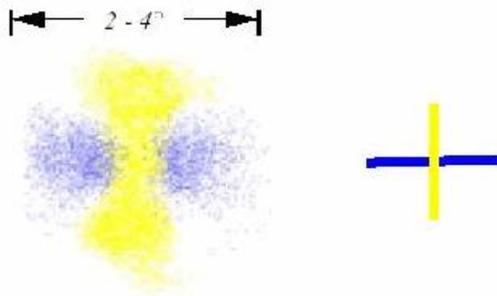


Abbildung 19.1: Das Haidinger-Büschel. Von dem nebenstehenden Richtungsschema mit Gelb- und Blaurichtung wird in den folgenden Abbildungen Gebrauch gemacht.

Die Erscheinung wurde von dem Mineralogen und Begründer der Geologischen Reichsanstalt in Wien, Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871) in den 40er Jahren des 19. Jahrhunderts bei Untersuchungen zum Pleochroismus der Kristalle entdeckt und in einer Reihe von lesenswerten Arbeiten zwischen 1844 und 1854 beschrieben [Hai44, Hai46b, Hai46a, Hai54]. Eine Würdigung des dort ausgebreiteten Beobachtungsreichtums kann hier nicht gegeben werden. Dafür sei auf die gegenwärtig umfangreichste Arbeit zum Haidinger-Büschel von Pröbstl [Prö98] verwiesen.

Das Haidinger-Büschel ist ein Kontrastphänomen. Es erscheint in der Folge des Anblicks einer linear polarisierten Fläche in der Mitte des Gesichtsfeldes und hat dort eine Ausdehnung von 2-4°. Die größte Hürde beim ersten Versuch, es zu sehen, besteht erfahrungsgemäß in einer der Zartheit der Erscheinung unangemessenen Erwartung. Die Erfahrung der spezifischen Kontraststärke, mit der das Büschel erscheint, lässt den Umgang damit rasch sicherer werden. Bereits Stokes [Sto83] hat sich mit der relativen Sichtbarkeit des Büschels in verschiedenen farbigen Beleuchtungen beschäftigt und darauf hingewiesen, dass die Erscheinung durch blaue Gläser am deutlichsten beobachtet wird, wogegen sie durch gelbe Gläser kaum mehr auszumachen ist. Quantitative Untersuchungen der Ophthalmologie, z.B. von Gehrke, bestätigen dies. Weiterhin bedingt ist die Deutlichkeit der Erscheinung von dem Polarisationsgrad der Ansicht: Je höher dieser ist, desto klarer tritt das Büschel hervor. Die untere Grenze liegt nach Messungen von Comberg und Witt bei einem Polarisationsgrad von 50%. Die Verweildauer des Büschels folgt der Lokaladaptation der Netzhaut und beträgt im Mittel einige Sekunden; dann verblasst es und kann durch Änderung der Netzhautorientierung bzw. der Polarisationsrichtung der Ansicht erneut hervorgerufen werden.

19.3 Wie kann man das Haidinger-Büschel beobachten?

Es werden im Folgenden vier Beobachtungssituationen vorgestellt. Dieselben sind so gewählt, dass zugleich ein Eindruck von der Wandelbarkeit der Bedingungen entsteht, unter denen das Haidinger-Büschel erscheint. Es ergibt sich eine Stufenfolge.

19.3.1 Das "Atmosphärenbüschel"

Das "Atmosphärenbüschel" erscheint dem Blick an den blauen Himmel, am deutlichsten im Winkelabstand von 90° zum augenblicklichen Sonnenstand. Dort ist die relative Polarisation des Himmels am größten (60-70%). Das Aufrufen des Büschels gelingt durch die Änderung der Netzhautorientierung gegenüber der Himmelsansicht, d.h. durch Hin- und Herwiegen des Kopfes. Oft genügt für die nötige Kontrastierung auch schon der Ansichtswechsel, der sich für den wandernden Blick von selbst ergibt.

19.3.2 Das "Oberflächenbüschel"

Das "Oberflächenbüschel" erscheint dem Blick auf optisch klare Mittel, die spiegeln und zugleich durchsichtig sind. Tritt man beispielsweise ans Ufer eines Sees, so zeigt sich zum einen das Spiegelbild des Himmels, zum andern die gehobene Ansicht des Grundes. Unter einer Blickrichtung mäßiger Schräge (Brewster-Winkel ($B = 53^\circ$)) auf die ruhige Wasseroberfläche erscheint das "Oberflächenbüschel"; es ist so orientiert, dass dem Beobachter die Blaurichtung stets parallel zur Wasseroberfläche erscheint.

19.3.3 Das "Festkörperbüschel"

Das "Festkörperbüschel" erscheint im Durchblick durch ein dichroitische Mittel, beispielsweise eine Turmalinplatte oder ein Stück der gängigen Polarisationsfolie. Dreht man ein solches Folienstück, während man es unmittelbar vor die Augen hält und gegen einen hellen Grund blickt, um 90° und verharret einen Moment, so erscheint das Büschel geradezu leuchtend für einige Sekunden, bevor es matter wird und schließlich wieder verschwindet. Erneutes Drehen und Verharren bringt die Erscheinung erneut hervor.

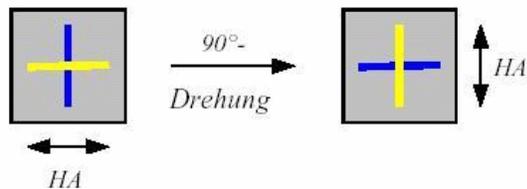


Abbildung 19.2: Das "Festkörperbüschel" im Durchblick durch eine Polarisationsfolie. *HA* kennzeichnet die Hauptachsenlage der Folie.

Mit ein wenig Übung findet man die Drehgeschwindigkeit, mit der sich im Durchblick durch die Folie der Kontrast und damit die Erscheinung des Büschels fortwährend erhalten lässt. Dann stellt man fest, dass die Orientierung des "Festkörperbüschels" mit derjenigen der Folie fest verbunden ist: Dreht man die Folie, so dreht sich das Büschel mit. Die Gelbrichtung des Büschels fällt mit der kristallographischen Hauptachse der Folie zusammen, die durch Strecken der Folie bei ihrer Herstellung entsteht. Die Polarisationsrichtung ist üblicherweise senkrecht dazu definiert. Ihr entspricht damit die Blaurichtung des Büschels.

19.3.4 Das "Beziehungsbüschel"

Haidinger beschreibt einen weiteren charakteristischen Beobachtungszusammenhang [Hai46a], der folgendermaßen nachvollzogen werden kann: Hält man vor die Polarisationsfolie aus Beobachtung 19.3.3 auf der vorherigen Seite ein doppelbrechendes Mittel, etwa eine dünne Glimmerplatte, und dreht dieselbe senkrecht zur Blickrichtung mit der Winkelgeschwindigkeit φ , während die Orientierung der Polarisationsfolie fest bleibt, so erscheint ein Büschel, das der ausgeführten Drehbewegung mit 2φ vorausseilt (Abbildung 19.3 a). Hält man dagegen die Glimmerplatte fest und dreht stattdessen die dahinter liegende Polarisationsfolie mit φ , so dreht sich das erscheinende Büschel mit $-\varphi$, also gleich schnell aber in entgegengesetzter Richtung (Abbildung 19.3 b).

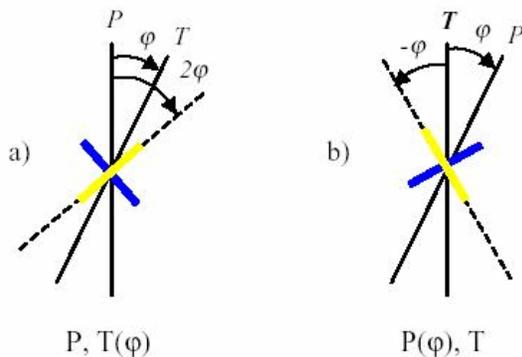


Abbildung 19.3: Das "doppeldrehende" Haidinger-Büschel. P kennzeichnet die Polarisationsrichtung der Folie, T eine Hauptachse der Glimmerplatte.

In beiden Fällen gilt: Der Winkelabstand zwischen dem "Festkörperbüschel" der Polarisationsfolie und demjenigen Büschel, welches beim Blick durch das Ensemble Glimmerplatte-Polarisationsfolie gesehen wird, ist immer doppelt so groß wie der ausgeführte Drehwinkel.

Die Glimmerplatte, an deren Stelle auch ein Stück gewöhnliche Frischhaltefolie benutzt werden kann, zeigt für sich genommen kein Büschel. Dieses tritt erst auf, wenn durch das doppelbrechende Mittel hindurch auf eine dahinterliegende Polarisationsfolie geblickt wird.

Im Vergleich mit dem "Festkörperbüschel" ist nun interessant, dass das doppeldrehende Büschel nur noch mittelbar korreliert ist mit der räumlichen Orientierung *eines* Festkörpers. Es ist vielmehr eine sichtbare Funktion der *Beziehung* zwischen den räumlichen Orientierungen *zweier* Festkörper (hier Glimmerplatte und Polarisationsfolie). Aus diesem Grund wurde

der zunächst etwas fremd klingende Name "Beziehungsbüschel" vorgeschlagen. Eine ausführlichere Erörterung der Bedingungen der "Doppeldrehung" im Kontext der modellfreien Optik wird in [GE01] gegeben.

Damit ist eine kleine aber charakteristische Auswahl von Beobachtungsmöglichkeiten zum Haidinger-Büschel vorgestellt. Dem Anfänger wird die Beobachtung des "Festkörperbüschels" empfohlen, die erfahrungsgemäß am leichtesten gelingt.

Die Identifikation zirkularer Polarisationszustände mit Hilfe des Haidinger-Büschels hat 1955 Shurcliff [Shu55] beschrieben. Dem Verfasser ist es allerdings nicht gelungen, die betreffenden Beobachtungen zu bestätigen. Ferner sei auf die Wirkung hingewiesen, die optisch drehende Substanzen in verschiedenen Aggregatzuständen auf die Stellung des Haidinger-Büschels haben. Solche und zahlreiche weitere Beobachtungen finden sich bei Pröbstl [Prö98].

19.4 Wie entsteht das Haidinger-Büschel im Auge?

Diese Frage führt weit in Spezialgebiete der Ophthalmologie hinein: in chemische und neurobiologische Untersuchungen zur Beschaffenheit und Funktionsweise der Netzhaut. Für einen Überblick über den diesbezüglichen Forschungsstand, der hier nicht wiedergegeben werden kann, sei auf die Arbeiten von Zhevandrov [Zhe95] und Mission [Mis93] verwiesen. Mit besonderer Rücksicht auf die dort referierten Untersuchungen von Boehm [Boe40], Cords [Cor47], De Vries [VJS53] und Hallden [Hal57] kann das aus physikalischer Sicht Wesentliche folgendermaßen zusammengefasst werden: Die Netzhaut weist zwei besondere und in ihrer Funktionsweise polare Strukturelemente auf: den blinden und den gelben Fleck (*Papilla nervi optici* und *Macula lutea*). Die Existenz des blinden Flecks folgt aus der Inversion der Netzhaut beim Auge des Wirbeltieres. Neben den damit für die Sehleistung verbundenen Vorteilen entsteht der Nachteil, dass die Nervenfasern innen abgehen und die Sinneszellschicht irgendwo durchbrechen müssen, um das Auge verlassen zu können. An dieser Stelle ist das Auge blind. Demgegenüber erreichen Struktur und Funktion der Netzhaut in der Macularegion, wo sich die Retina zur Netzhautgrube (*Fovea centralis*) einsenkt, ihre Kulmination. Hier ist die Stelle des schärfsten und farbintensivsten Sehens, wo nur Zapfen vorhanden sind, die aber ein stäbchenartiges Aussehen erlangen. Stäbchen fehlen ganz. Die *Fovea* kann man sich wie mit dem Daumen eingedrückt entstanden denken, so dass alle Schichten, mit Ausnahme der Sinneszellschicht, nach der Seite verschoben sind. Die menschliche *Macula* hat ungefähr einen Durchmesser von 2 bis 2,5 mm, die *Fovea* von 0,5 bis 1 mm. Die zitronengelbe Färbung kommt durch einen in den Optikusganglien abgelagerten Farbstoff (Xanthophyll), ein Karotinoid, zustande [Roh72, S. 17-50].

Im Hinblick auf die Entstehung des Haidinger-Büschels ist nun dreierlei bemerkenswert:

1. Der gelbe Fleck ist der Ort auf der Netzhaut, welcher der Mitte des Gesichtsfeldes entspricht, wo das Haidinger-Büschel erscheint.
2. Die Ausdehnung des gelben Flecks entspricht recht genau der gesehenen Größe des Haidinger-Büschels.
3. Die Nervenfasern der Zapfen im Bereich der Fovea breiten sich, ausgehend von der Mitte der Netzhautgrube, radiärsymmetrisch aus und laufen im blinden Fleck wieder zusammen. Der in diesen radiärsymmetrischen Faserverlauf eingelagerte Farbstoff bewirkt, dass das Gewebe vor der lichtempfindlichen Netzhaut mit radialer Vorzugsrichtung selektiv absorbiert. Damit wirkt der gelbe Fleck wie ein radiärsymmetrischer Dichroit bzw. Analysator.

19.5 Ein Modell

Der Verfasser hat ein Modell eines solchen Analysators gebaut. Es besteht aus 16 zwischen zwei Glasplatten eingespannten Segmenten linear polarisierender Folie, deren Polarisationsrichtung jeweils radial orientiert ist (Abbildung 19.4).

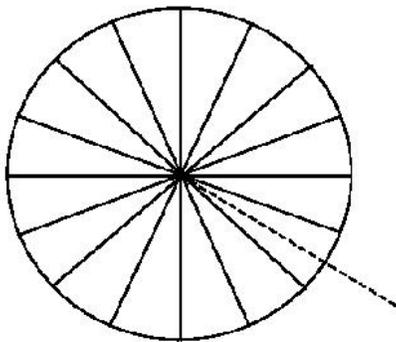


Abbildung 19.4: Radiärsymmetrischer Analysator mit 16 Segmenten. Die Lage der Polarisationsrichtung je Segment ist für ein Segment durch die gestrichelte Linie angegeben.

Die Helligkeitsverteilung, die sich ergibt, wenn man diesen "Radiäranalysator" durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie betrachtet, lässt eine auffallende Ähnlichkeit mit der Form des Haidinger-Büschels erkennen (Abbildung 19.5 auf der nächsten Seite).

Wäre – so könnte man schlussfolgern – der gelbe Fleck die einzige am Zustandekommen des Haidinger-Büschels beteiligte Komponente des Auges, so wäre dieses ein reines Hell-Dunkel-Gebilde, ein "Schattenbüschel", wie Abbildung 19.5 auf der nächsten Seite schematisch zeigt.

Frühere Ergebnisse zusammenfassend und mit Hilfe von Simulationen hat Mission [Mis93] die These bestätigt, dass die zweite entscheidende, die Farbigkeit des Haidinger-Büschels bedingende Komponente des Auges die Hornhaut ist. Er vergleicht sie mit einem

konvexen zweiachsig-doppelbrechenden Kristall. Die Doppelbrechung isolierter Hornhautpräparate im Bereich der optischen Achse beträgt nach Messungen von Stanworth [SN53] $\Delta n = 0,0028$. Bedingt durch ihre Wachstumseigenschaften weist die Hornhaut ferner eine radiärsymmetrische Anisotropie auf. Die mittlere optische Dicke beträgt im blauen Spektralbereich eine Achtel-Wellenlänge (72 nm)[Shu74]. Die Hornhaut wirkt demnach vereinfacht gesagt wie ein radiärsymmetrisches $\lambda/8$ -Plättchen, d.h. so, dass bei natürlicher Beleuchtung die dunklen Bereiche des "Schattenbüschels" in Abbildung 19.5 gelb und die hellen blau-violett erscheinen.

Für ein Modell der so verstandenen Hornhautfunktion ergab sich nach längerem Probieren, dass die Cellophanfolie, die zum Verpacken der Schachteln von Niederegger Marzipan-Pralinen verwendet wird, gerade die erforderlichen optischen Eigenschaften erfüllte. Es wurden 16 Segmente dieser Folie ausgeschnitten und auf diejenigen des "Radiäranalysators" aufgebracht. Ohne hier näher auf die optischen Eigenschaften ein- bzw. zweiachsiger Kristalle einzugehen sei erwähnt, dass beim Ausschneiden der doppelbrechenden Foliensegmente darauf geachtet wurde, dass der Winkel zwischen der Hauptachse der Folie und der Symmetrieachse der Segmente, die mit der radial orientierten Polarisationsrichtung des jeweiligen Analysatorsegments identisch war, 45° betrug. Unter diesem Winkel wird die doppelbrechende Folie als Transformator zwischen Polarisator und Analysator maximal wirksam; bei 0° bzw. 90° Hauptachsenlage gegenüber der Polarisationsrichtung ist sie unwirksam. Das ergibt sich aus der geometrischen Beziehung zwischen den beteiligten optischen Elementen und kann leicht nachgerechnet werden [GE01].

Betrachtet man nun den mit einem radiärsymmetrischen Transformator versehenen "Radiäranalysator" durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie, so erscheinen die in Abbildung 19.5 dunklen Bereiche gelb und die hellen in komplementärem Blau-Violett. Man hat damit den deutlichen Eindruck, die wesentlichen optischen und geometrischen Bedingungen für Form und Farben des Haidinger-Büschels kennen gelernt zu haben. Abbildung 19.6 auf der nächsten Seite fasst diese Bedingungen nochmal schematisch zusammen.

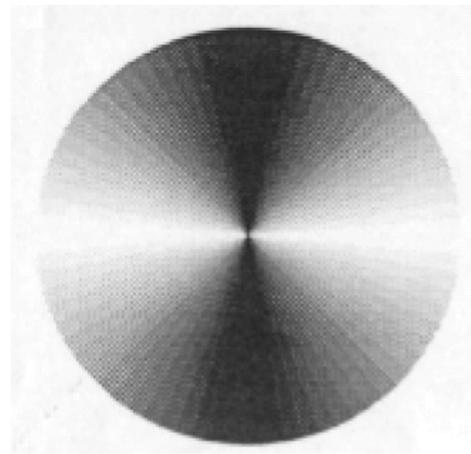


Abbildung 19.5: Geglättete Helligkeitsverteilung beim Anblick des "Radiäranalysators" durch eine Polarisationsfolie, entnommen aus [Mis93].

19.6 Schluss

Derjenige, der die vorangegangene Erörterung zur Beobachtung und Erklärung des Haidinger-Büschels nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch nachvollzieht, indem er vielleicht selbst zu den hier beschriebenen Mitteln greift, wird die in Abbildung 19.6 gegebene Zusammenfassung der für das Auftreten des Haidinger-Büschels wesentlichen optischen Komponenten möglicherweise als einfach und schlüssig beurteilen. Demgegenüber sei angemerkt, dass hier eine dem vorgegebenen Rahmen angepasste Vereinfachung der z.T. sehr viel komplizierteren Zusammenhänge und Einzelheiten gegeben wurde. Die Erforschung des Haidinger-Büschels ist keineswegs abgeschlossen, seine Erklärung auch nicht. Das bemerkt zuletzt jeder, der die merkwürdig ungegenständliche Qualität der Erscheinung als Bereicherung seines Sehfeldes schätzen gelernt hat.

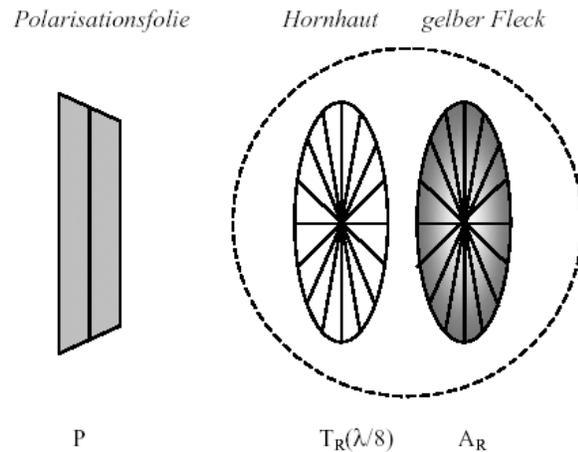


Abbildung 19.6: Schema des mit dem Auftreten des Haidinger-Büschels verbundenen Bedingungs-zusammenhangs zwischen gelbem Fleck und Hornhaut im Auge und einer polarisierten Ansicht, die hier durch eine Polarisationsfolie gegeben ist.

Literaturverzeichnis

- [Ale95] ALEXANDRITIS, E. ; STRAUB, W. (Hrsg.) ; KROLL, P. (Hrsg.) ; KÜCHLE, H.J. (Hrsg.): *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*. Stuttgart : Enke, 1995
- [Boe40] BOEHM, G.: Über maculare (Haidingersche) Polarisationsbüschel und über einen polarisationsoptischen Fehler des Auges. In: *Acta Ophthalmol* 18 (1940), S. 109–142
- [CE72] COMBERG, D. ; EHRLICH, W. ; VELHAGEN, K. (Hrsg.): *Der Augenarzt*. Bd. 2. Leipzig : Thieme, 1972
- [Cor47] CORDS, O.: Das Haidingersche Büschel und seine Erklärung als Beitrag für eine physikalische Deutung des Sehvorganges. In: *Optik* 2 (1947), S. 423–433
- [Fri49] v. FRISCH, K.: Die Polarisation des Himmelslichts als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen. In: *Experientia* 5 (1949), S. 142–148
- [GE01] GREBE-ELLIS, J.: Doppeldrehung und Polarisation. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 75 (2001), Nr. 2, S. 13–32

- [GE02] GREBE-ELLIS, J.: Zur Phänomenologie der Polarisation. In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Beitrag zur Tagung der GDGP 2001 in Dortmund* Bd. 22. Berlin : Leuchtturm, 2002, S. 254–256
- [Goe81] v. GOETHE, J. W.: Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt. In: *Naturwissenschaftliche Schriften* Bd. 13. München : C.H. Beck, 1981, S. 10–20
- [Gre01] GREBE, J.: Vom Polarisations Schatten – Eine phänomenologische Betrachtung. In: *MNU* 54 (2001), Nr. 8, S. 452
- [Hai44] HAIDINGER, W. K.: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. In: *Poggendorf Annalen* 63 (1844), S. 29–39
- [Hai46a] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel auf Flächen, welche das Licht in zwei senkrecht aufeinander stehende Richtungen polarisieren. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 305–319
- [Hai46b] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel im geradlinig polarisiertem Lichte. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 73–87
- [Hai54] HAIDINGER, W. K.: Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut. In: *Poggendorf Annalen* 93 (1854), S. 318–320
- [Hal57] HALLDEN, U.: An explanation of Haidinger's brushes. In: *Arch. Ophthal* 57 (1957), S. 393–399
- [Hel96] v. HELMHOLTZ, H. *Handbuch der physiologischen Optik*. 1896
- [Mai81] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 35 (1981), Nr. 2, S. 26–42
- [Mai84] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 40 (1984), S. 42–52
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [Mis93] MISSION, G. P.: Form and behavior of Haidinger's brushes. In: *Ophthal. Physiol. Opt.* 13 (1993), S. 392–396
- [MO98] v. MACKENSEN, M. ; OHLENDORF, H.-Ch. *Modellfreie Optik*. 1998
- [Mue48] MUELLER, H.: The Foundations of Optics. In: *Journal of the Optical Society of America* 38 (1948), S. 661
- [Prö98] PRÖBSTL, A.: Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. In: *Elemente der Naturwissenschaften* 68 (1998), Nr. 2, S. 1–26

- [Roh72] ROHEN, J. ; v. VELHAGEN, K. (Hrsg.): *Der Augenarzt*. Bd. 1. Leipzig : Thieme, 1972
- [Shu55] SHURCLIFF, W. A.: Haidinger's brushes and circularly polarized light. In: *Journal of the Optical Society of America* 45 (1955), S. 399
- [Shu74] SHUTE, C. C. D.: Haidinger's brushes and predominant orientation of collagen in corneal stroma. In: *Nature* 250 (1974), S. 163–164
- [SN53] STANWORTH, A. ; NAYLOR, E.: The cornea and the Haidinger effect. In: *Journ. of Exp. Biol.* 30 (1953), S. 160–163
- [Sto83] STOKES, G. G.: On Haidinger's brushes. In: *Mathematical and physical papers* 2 (1883), S. 362–364
- [VJS53] DE VRIES, H. ; JIELOF, R. ; SPOOR, A.: Properties of the eye with respect to polarised light. In: *Physica* 19 (1953), S. 419–432
- [Wat75] WATERMAN, T.H. ; EVANDS, G.C. (Hrsg.): *Natural Polarised Light and e-Vektor Discrimination by Vertebrates in Light as an Ecological Factor II*. Rainbridge : Blackwell Scientific, 1975
- [Weh98] WEHNER, R.: Der Himmelskompass der Wüstennameisen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11 (1998), S. 56–67
- [Zhe95] ZHEVANDROV, N. D.: Polarisation physiological optics. In: *Physics Uspekhi* 38 (1995), Nr. 10, S. 1147–1167

Veröffentlichung 20

Doppeldrehung und Polarisation

Johannes Grebe

(aus: *Elemente der Naturwissenschaft* 75, Nr. 2, 2001)

Gestalt wirkt auf Gestalt.¹

Rudolf Steiner

Einleitung

Veränderungen, die sich für Ansichten unserer Umgebung durch eine sogenannte Polarisationsfolie ergeben, legen nahe, den Übergang vom Hellbild zum Dunkelbild in der Beziehung zwischen Polarisator P und Analysator A genauer zu untersuchen. Dass sich die freie Durchsicht durch zwei halbtransparente optische Mittel in der Variation ihrer räumlichen Beziehung zum undurchsichtigen Dunkelbild abschließt, lässt einen immer auf's Neue erstaunen. Worum handelt es sich hier?

¹Dieses Zitat ist der Mitschrift eines Vortrages entnommen, den Rudolf Steiner im Rahmen des Zweiten Naturwissenschaftlichen Kurses am 9. März 1920 in Stuttgart vor Lehrern der Waldorfschule und einigen Gästen gehalten hat. Steiner erläutert darin das erweiterte Spektrum der Natur und die Beziehungen zwischen den einzelnen Gebieten dieses Spektrums. Im Zusammenhang mit dem sogenannten U-Gebiet kommt er dabei auf Polarisationserscheinungen zu sprechen, die immer "unter dem Einfluss der Wirkung des Gestalteten aufeinander" entstehen. Im Weiteren werden Beziehungen der Polarisation zu anderen Gebieten des Spektrums charakterisiert. Diese Zusammenhänge zu *denken* fällt mir auch nach Jahren äußerst schwer. Indem ich oben stehenden Satz zitiere, will ich deshalb *nicht* den Anschein erwecken, als enthielten die Ausführungen dieses Artikels etwa eine beispielhafte Erläuterung der Hinweise Steiners. Dazu müsste ich diese verstanden haben. Das ist nicht der Fall. Deshalb *zitiere* ich sie. Die Frage, wie das Verhältnis zu Erscheinungen der Natur gestaltet werden kann, sodass sie im Menscheninnern zu sprechen beginnen, erhebt sich auch gegenüber den Denkgestaltungen Rudolf Steiners. In diesem Sinne versteht sich der vorliegende Artikel als Verständigungsangebot zur Ausbildung einer Frage, auf die der zitierte Satz eine Antwort sein kann. Georg Maier hat in "Die Elemente als Stufen der Naturbetrachtung" gezeigt, wie in den Erscheinungen des Festen, Flüssigen, Gasigen und der Wärme *selbst* Hinweise zur Ausbildung ihnen gemäßer Betrachtungsweisen gefunden werden können und wie dabei aus dem Betrachter ein *Teilnehmer* wird [Mai70]

Mit Hilfe des Haidinger-Büschels² lassen sich die Hauptachsen der Folien identifizieren. Dann gilt für die Ansicht einer hellen Fläche durch A und P : Haben wir das *Hellbild*, so sind die Richtungen der auf A und P bezogenen Haidinger-Büschel *parallel*, haben wir dagegen das *Dunkelbild*, stehen diese Richtungen *senkrecht* zueinander. Der Übergang vom Hellbild zum Dunkelbild ist eine Funktion des Richtungswinkels (Malus-Gesetz).

Das Zusammenwirken zweier Linearpolarisatoren nach der beschriebenen Art besteht im luft-erfüllten, durchsichtigen Raum. Der optische Abstand zwischen A und P und die relative Orientierung der Blickrichtung spielen für die beschriebene Helligkeitscharakteristik keine Rolle. Das ändert sich, sobald ein optisches Mittel zwischen A und P zum Beispiel doppelbrechend ist: Aufhellung des Dunkelbildes, Abdunkelung des Hellbildes, leuchtende Farben treten auf – ein zunächst verwirrendes Spiel zwischen Durchsichtigkeit und Undurchsichtigkeit in farbigen Übergängen. Optische Mittel, die solches hervorbringen, finden sich in großer Zahl. Bekannt sind die Experimente mit einfacher Frischhaltefolie, Tesafilm, Cellophan beziehungsweise mit den natürlichen anisotropen Mineralien wie Glimmer, Quarz etc., die hier in Frage kommen [Hec99]. Wegen der Veränderung, die solche Mittel³ zwischen A und P am Bild bewirken, werden sie auch *Transformatoren* genannt.

Die Behandlung der Farben, die in solchen Experimenten auftreten, übersteigt den Rahmen dieses Artikels. Wir beschränken uns auf die Untersuchung der Bildhelligkeit. In diesem Sinne werden im folgenden einfarbige Bilder betrachtet. Ein Bild ist dann eine durch das optische Ensemble A , T und P ⁴ vorgenommene Ansicht z.B. einer roten Leuchte. Das Helligkeitsmaß des Bildes hängt offensichtlich zum einen von den Winkelstellungen zwischen T und P ab: Es gibt Stellungen, bei denen das Bild keine Veränderung zeigt; der Wandel der Bildhelligkeit unter Drehungen des Analysators entspricht für diese Stellungen von T dem Malus-Gesetz. Dann gibt es aber auch solche, bei denen das Bild eine maximale Abweichung von der Malus-Charakteristik zeigt: Wo wir vorher ohne T bei gekreuzten Folien P und A das undurchsichtige Dunkelbild erhielten, ist mit dazwischengeschobenem T das Bild durchsichtig bzw. aufgehellt und umgekehrt: das ursprüngliche Hellbild bei parallelen Folien P und A erscheint mit dazwischengeschobenem T abgedunkelt. Es zeigt sich zum andern, dass verschiedene Schichtdicken

²Das Haidinger-Büschel, benannt nach seinem Entdecker Wilhelm Karl Haidinger, ist eine zarte Farberscheinung, mit der das Auge auf den Anblick einer linear polarisierten Ansicht antwortet. Es hat eine Größe von $2 - 4^\circ$ und erscheint in der Mitte des Gesichtsfeldes. Es ist – ähnlich den Nachbildern – ein Kontrastphänomen und muss immer erneut hervorgerufen werden. Das kann durch Änderung der Netzhautorientierung, d.h. durch Hin- und Herwiegen des Kopfes geschehen, oder durch Veränderung der Polarisationsrichtung der angeblickten Fläche. Das geht am besten mit einer Polarisationsfolie, durch die man eine weiße Fläche anblickt, während man sie in der Ebene senkrecht zur Blickrichtung mit kurzen Pausen hin- und herdreht. Die Richtung des dabei erscheinenden Büschels ist mit der Orientierung der Folie fest verbunden, d.h. es dreht sich mit. – Eine ausführliche Würdigung des Haidinger-Büschels ist gegeben in [Prö98].

³Dazu gehören auch alle *optisch aktiven* Substanzen, auf die in diesem Zusammenhang aber nicht näher eingegangen wird.

⁴Zur Schreibweise: Die jeweils in Betracht kommenden optischen Elemente werden im Folgenden in eckige Klammern gesetzt: $[A, T, P]$. Die Reihenfolge der Aufzählung ist, so weit es sich um subjektive Versuche handelt, immer diejenige, in der die Elemente vom Auge weg zur angeblickten Fläche hin angeordnet sind.

für T das Abweichen vom Malus-Gesetz unterschiedlich stark hervortreten lassen, und es wird vermutet, dass sich für eine kontinuierliche Zunahme der Schichtdicke das Verhalten dieses Abweichens über Maxima und Minima wiederholt.

Eine genauere Betrachtung und Ordnung dieser Erscheinungszusammenhänge soll im Folgenden vor dem Hintergrund zweier Hinweise unternommen werden. Der erste stammt von Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871) und bezieht sich auf Beobachtungen mit dichroitischen und doppelbrechenden Medien [Hai44, Hai46]. Der zweite stammt von Mario Howald-Haller (1925-2001) und betrifft einen Ansatz zum messenden Erfassen der richtungsabhängigen Helligkeit beim Zusammenwirken von Polarisationszuständen [How64].

20.1 Doppeldrehung

Haidinger schildert die Beobachtung der nach ihm benannten Büschel beim Blick durch dünne Glimmer-Blättchen auf eine "polarisierte Lichtfläche". Dabei macht er die Entdeckung, dass bei einer Drehung des Blättchens um die Blickrichtung mit ϕ das Büschel mit 2ϕ in Drehrichtung vorausleitet. Hält er dagegen das Blättchen fest und dreht stattdessen die Polarisationsrichtung der Fläche mit ϕ , so dreht sich das Büschel mit $-\phi$, also gleichschnell aber in entgegengesetzter Richtung.

In beiden Fällen gilt: Die Winkeldistanz zwischen dem Büschel der polarisierten Fläche und demjenigen, welches beim Blick durch das Glimmer-Blättchen auf die Fläche gesehen wird, ist immer doppelt so groß wie der ausgeführte Drehwinkel. Deshalb sprechen wir hier von "Doppeldrehung"⁵. Das bedeutet: Immer dann, wenn eine Hauptachse G des Glimmer-Blättchens parallel oder senkrecht zur Polarisationsrichtung P der Fläche steht, d.h. für $\phi = n \cdot 90^\circ$ mit $n = 0, 1, 2, 3$, sind die Büschelrichtungen parallel; die Wirkung des Glimmer-Blättchens auf den Bildzustand verschwindet. Wir bezeichnen deshalb die Zustände für $\phi = n \cdot 90^\circ$ als *entspannte* Bildzustände. Für $\phi = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$ mit $n = 0, 1, 2, 3$ stehen die Büschel dagegen senkrecht; die Abweichung der Büschelstellung für $[T, P]$ von derjenigen für P allein bzw. die Wirkung des Glimmer-Blättchens auf den Bildzustand wird maximal. Wir bezeichnen deshalb die Zustände für $\phi = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$ als *angespannte* Bildzustände.

20.2 Polarisation und Skalarprodukt

Howald-Haller schlägt die Darstellung von linear polarisierten Zuständen durch Vektoren vor⁶. Ordentliche und außerordentliche Bilder eines Doppelspates sind senkrecht zueinander linear

⁵Die Bezeichnung "Doppeldrehung" kommt bei Haidinger nicht vor. Sie hat sich in Gesprächen mit David Auerbach und Wilfried Sommer als nützlich erwiesen.

⁶Die von dem amerikanischen Physiker R. Clarke Jones Anfang der vierziger Jahre des 20. Jahrhunderts entwickelte Vektor-Darstellung [Jon41] zur Beschreibung von Polarisationszuständen kohärenter Strahlenbündel

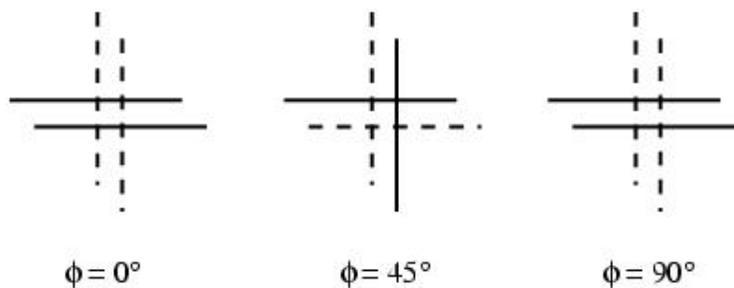


Abbildung 20.1: Die Stellungen der Haidinger-Büschel, die sich beim Blick durch $[T(\phi), P]$ zeigen, jeweils bezogen auf das vertikale Büschel von P , für eine Drehung von T um $\phi = 90^\circ$. (Die Gelbrichtung der Büschel ist gestrichelt, die Blaurichtung durchgezogen gezeichnet; vgl. Fußnote 7.)

polarisiert. Sie werden – bezogen auf ein Koordinatensystem – charakterisiert durch: $\mathbf{h} = (1,0)$: horizontal linear polarisiert, und $\mathbf{v} = (0,1)$: vertikal linear polarisiert. Die Verknüpfung wird in der Art des skalaren Produktes vollzogen. Im Falle der Quadratur (Winkel α zwischen den Polarisationsrichtungen gleich $90^\circ, 270^\circ$) ergibt sich $(1,0)(0,1) = (0,1)(1,0) = 0$, d.h. Auslöschung. Im Falle der Konjunktion ($\alpha = 0^\circ$) wird $(1,0)(1,0) = (0,1)(0,1) = 1$, d.h. das Hellbild ist erhalten. Dasselbe gilt bei Opposition ($\alpha = 180^\circ$). Die Zwischenstellungen ergeben Zwischenhelligkeiten, die sich gemäß dem Malus-Gesetz durch Gewichtung mit dem Quadrat des Richtungscosinus ergeben: $I(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha$.

Der Hinweis, der hiermit gegeben ist, wird so verstanden: Die räumlichen Gestaltungen der optischen Elemente Polarisator und Analysator sind durch Richtungen⁷ P und A ausgezeichnet, die multiplikativ aufeinander bezogen werden, indem der Vektor \mathbf{e}_p der Richtung P auf die Richtung A projiziert wird. Das geschieht durch skalare Multiplikation von \mathbf{e}_p mit \mathbf{e}_a :

gibt für die linearen P -Zustände Ausdrücke an, die formal identisch sind mit den von Howald-Haller vorgeschlagenen. Der Ausgangspunkt ist dagegen jeweils ein anderer. Jones beschreibt mit P -Zuständen Zustände eines in der Vorstellung zugrunde gelegten Lichtwellenfeldes, das durch den elektrischen Feldvektor repräsentiert wird. Die Zerlegung dieses Vektors führt über die Wahl geeigneter komplexer Phasenfaktoren zu Sätzen orthonormierter Vektoren, deren Linearkombinationen die Darstellung jedes beliebigen P -Zustandes gestatten. Im Gegensatz dazu und im Sinne des hier angestrebten Vorgehens geht Howald-Haller von *Erscheinungen* aus, d.h. von Ansichten einer hellen Fläche, die durch Ensembles optisch anisotroper Mittel betrachtet wird. Dabei besteht kein Anlass, von Vorgängen mit Strahlenbündeln zu sprechen. P -Zustände sind *Bildzustände*, die mit geordneten Beobachtungshandlungen verknüpft sind. Die räumlichen Gestaltungen der beteiligten optischen Mittel sind durch Richtungen ausgezeichnet. Diese werden durch normierte Vektoren dargestellt. Die Beziehungen zwischen den Mitteln sind multiplikativ; sie erscheinen im Bild charakteristischer Helligkeitsverläufe zwischen Hell- und Dunkelbild. Dem entspricht das Skalarprodukt zwischen den zugehörigen Vektoren bzw. das Quadrat desselben als Funktion der beteiligten Winkel.

⁷Bisher haben wir die Orientierung der Folie auf die Ausrichtung des zugehörigen Haidinger-Büschels bezogen. Howald-Haller bezeichnet diese Büschelrichtung – der Farbigkeit des Büschels folgend – als "Gelbrichtung". Sie fällt bei der Polarisationsfolie mit deren Hauptachse zusammen. Senkrecht zur "Gelbrichtung" steht die "Blaurichtung". Welche der beiden als Polarisationsrichtung ausgezeichnet wird, ist im Prinzip beliebig. Haidinger folgt dem Augenschein und bezeichnet die "Gelbrichtung" als Polarisationsrichtung. Damit steht er im Widerspruch zur Konvention im Rahmen des Wellenmodells. Um der formalen Übereinstimmung mit dieser Konvention Willen identifizieren wir die Polarisationsrichtung mit der Blaurichtung. In diesem Sinne sind hier P und A die Blaurichtungen der zugehörigen Büschel.

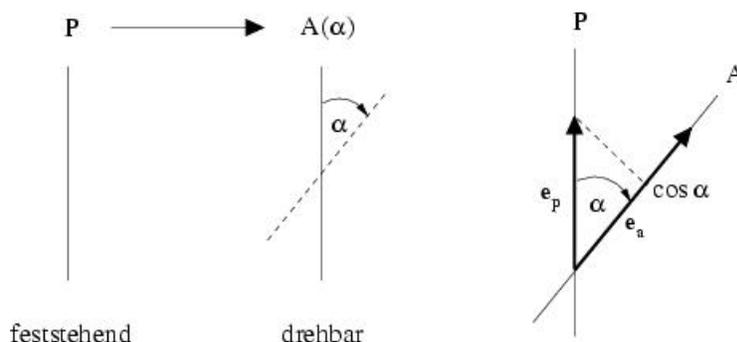


Abbildung 20.2: Die räumliche Beziehung von P auf A über das Skalarprodukt.

$\mathbf{e}_p \cdot \mathbf{e}_a = \cos \alpha$. Dabei ist α der Richtungswinkel zwischen P und A . Die Polarisationsrichtung des durch A vor P gesehenen Bildes ist dann durch die Richtung A gegeben, die Helligkeit – bezogen auf das Hellbild ($\alpha = 0^\circ$) – durch das Quadrat des Produktes $\mathbf{e}_p \cdot \mathbf{e}_a$ (Abbildung 20.2).

20.3 Orientierung

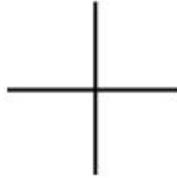
Im Folgenden werden zunächst die Beobachtungen Haidingers nachvollzogen, um die Bedingungen der "Doppeldrehung" noch genauer kennen zu lernen. Der rhythmische Wechsel von *Anspannung* und *Entspannung* des Bildes, bezogen auf die in Gedanken festgehaltene Stellung des Haidinger-Büschels für P (Abbildung 20.1 auf der vorherigen Seite) wird dann durch einen weiteren Linearpolarisator A angeschaut. Das räumliche Zusammenspiel von P und $T(\phi)$ wird damit auf eine weitere Richtung A bezogen, und die Beziehung zwischen $T(\phi)$ und P erscheint im Bild eines charakteristischen Helligkeitswandels, der vom Malus-Gesetz abweicht.

Jeder Stellung zwischen T und P kann mit A ein Helligkeitswert I zugeordnet werden. φ_P , φ_A sind die Winkel zwischen P und T bzw. T und A . I ist außerdem eine Funktion der Schichtdicke δ von T . Es ergeben sich Bildfolgen, in denen die räumlichen Variationen zwischen A , T und P in Abhängigkeit von δ angeschaut werden können. Der innere Zusammenhang dieser Bilder ist in den Ordnungen ihres Erscheinens selbst gegeben. Solche Ordnungen sind: Zyklizität, Symmetrien, sog. Malus-Linien. Ein analytischer Ausdruck für $I(\varphi_P, \varphi_A, \delta)$ ergibt sich schließlich durch geeignete Anwendung des Ansatzes von Howald-Haller "Polarisation und Skalarprodukt" auf das Ensemble $[P, T, A]$.

20.4 Doppelbrechung – Doppeldrehung

Das Glimmer-Blättchen wird von Haidinger stellvertretend für diejenigen optischen Mittel genannt, welche die von ihm entdeckte Doppeldrehung des Büschels zeigen, und das sind

im wesentlichen *doppelbrechende* Kristalle. Die räumliche Gestaltung solcher Mittel wird im Gegensatz zu derjenigen des Linearpolarisators durch ein *rechtwinkliges Richtungskreuz* charakterisiert:



Damit wird den beiden Richtungen der Doppelbrechung bzw. den in der Doppeldrehung erscheinenden Symmetrieverhältnissen Rechnung getragen – ohne dass jedoch die Beziehung zwischen Büschel und doppelbrechendem Mittel dadurch schon näher bestimmt ist. Wir erinnern uns ferner, dass die beiden Teilbilder, die ein Doppelspat von einem Urbild zeigt, unterschiedlich stark gehoben erscheinen. Das sogenannte *außerordentliche* Bild kann dabei aus dem *ordentlichen* Bild herausgeschoben gedacht werden, und zwar nach Maßgabe der Querwirksamkeit einer zweiten optischen Dichte n_a , die senkrecht zu derjenigen wirksam ist, die sich in der Hebung des ordentlichen Bildes zeigt (n_o).⁸

Als *Maß* der Doppelbrechung kann zunächst der Abstand genommen werden, den die beiden Teilbilder bei senkrechtem Blick durch Kristalle gleicher Dicke voneinander haben. Entscheidend dafür ist aber die Brechzahldifferenz $\Delta = n_a - n_o$, welche die maximale unterschiedliche Gewichtung der optischen Wege im Kristall zum Ausdruck bringt, je nach dem, ob sie parallel oder senkrecht zur optischen Achse liegen.

Für unsere Zwecke wählen wir als Transformator einfache Frischhaltefolie. Das hat den Vorteil, dass wir die Dicke δ schichtweise ändern können. Die Wirkung von T auf das Bild zeigt sich damit als Funktion der Schichtdicke beziehungsweise der Anzahl gleich dicker Folienschichten.

Auf der Grundlage der sich ergebenden Beobachtungen wird es möglich sein, δ als Zusammenfassung der räumlichen Bedingungen, die für die Doppelbrechung in dem hier untersuchten Rahmen eine Rolle spielen, noch näher zu charakterisieren. Das ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn nach einem analytischen Ausdruck für den Helligkeitswandel der Bilder gesucht wird (Abschnitt 20.6 auf Seite 196).

T zeigt im Durchblick für sich genommen weder eine orientierungsabhängige Helligkeitsänderung noch ein Haidinger-Büschel. Letzteres tritt erst auf, wenn durch T auf eine linear polarisierte Fläche geblickt wird bzw. wenn T ein Linearpolarisator P vorausgeht (z.B. eine Polarisationsfolie). Dabei ist auf die Reihenfolge⁹ zu achten: Nur die Durchsicht durch T

⁸Für Kristalle, bei denen die Hebung des ordentlichen Bildes diejenige des außerordentlichen überwiegt: $n_o > n_a$, ergibt die Differenz der Brechzahlen $\Delta = n_a - n_o$ einen negativen Wert; sie werden deshalb optisch *negativ* doppelbrechend genannt (z.B. Calcit, Turmalin, Beryll). Entsprechend heißen Kristalle mit $n_o < n_a \Rightarrow n_a - n_o > 0$ optisch *positiv* doppelbrechend (z.B. Quarz, Rutil, Eis).

⁹Die Reihenfolge der Aufzählung $T, P \dots$ ist hier und im Folgenden immer die Reihenfolge, in der die optischen Elemente vom Auge weg zur angeblickten Fläche hin angeordnet sind.

auf P zeigt das doppeldrehende Haidinger-Büschel. Wird diese Reihenfolge vertauscht, kann zwar mit P ein Büschel hervorgerufen werden; dieses ist jedoch mit der räumlichen Orientierung von P fest verbunden, d.h. es ist nicht doppeldrehend, sondern einfach mitdrehend und erscheint auch ohne T .

Für den durch das doppeldrehende Haidinger-Büschel ausgezeichneten Bildzustand gilt damit:

T und P sind nicht vertauschbar \Leftrightarrow Die Blickrichtung durch das optische Ensemble $[P, T]$ ist nicht umkehrbar.

Ferner: Das doppeldrehende Büschel erscheint nur, wenn die räumliche Beziehung zwischen P und T verändert wird; es scheint selbst Ausdruck dieser Beziehung zu sein.

Pröbstl hat gezeigt, dass sich die Erscheinungsweisen des Haidinger-Büschels in Stufen gliedern lassen [Prö98]:

- (a) das *Atmosphärenbüschel*, zu sehen am blauen Himmel, besonders deutlich senkrecht zur Sonne: immer auf Großkreisen durch die Sonne liegend und damit nach dieser weisend;
- (b) das *Oberflächenbüschel*, zu sehen unter Brewster-Winkel z.B. im Spiegelbild einer hellen Wolke in einer Pfütze: immer auf den Beobachter gerichtet;
- (c) das *Festkörperbüschel*, hervorgerufen mit dichroitischen Kristallen: immer mit der räumlichen Orientierung derselben fest verbunden, d.h. mitdrehend und dadurch auf diesem Wege leicht hervorzurufen.

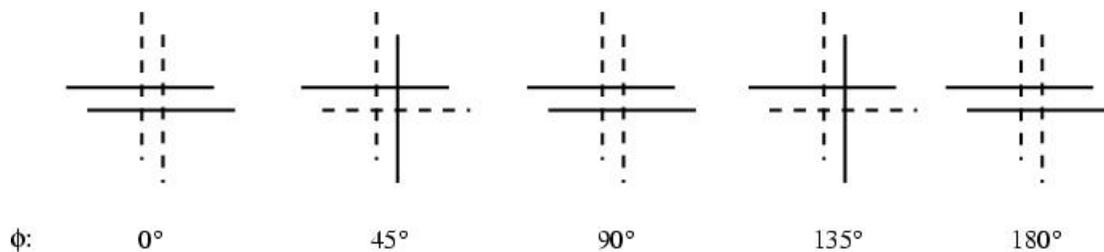


Abbildung 20.3: Zwei Doppeldreher-Zyklen für eine Drehung von T bzw. P .

Vor diesem Hintergrund stellt die Beobachtung der beschriebenen Doppeldrehung eine weitere Stufe dar: Die Bewegung des Büschels ist hier nur noch mittelbar korreliert mit einer Raumgestalt. Sie ist vielmehr eine Funktion der Beziehung zwischen den Gestaltungen zweier Körper (hier T und P). Wir schlagen deshalb die Bezeichnung *Beziehungsbüschel* vor.

In der Abbildung 20.3 sind die Büschelstellungen des Ensembles $[T(\phi), P]$ für eine Drehung von $\phi = 180^\circ$ dargestellt, bezogen auf die vertikale Büschelstellung, die sich für P allein ergäbe.

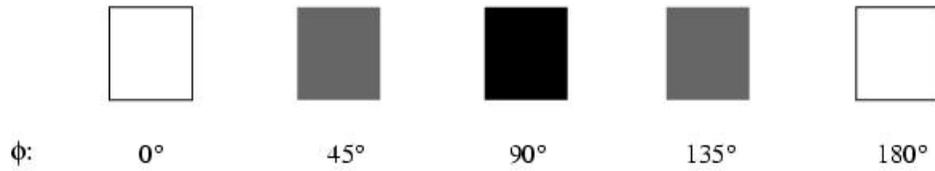


Abbildung 20.4: Der Malus-Zyklus, ausgehend vom Hellbild ($A \parallel P$) mit $\alpha_M = 2\phi$.

Charakteristisch ist der Wechsel zwischen parallelen und senkrechten Bündelstellungen, – zwischen *entspannten* und *angespannten* Bildzuständen in Schritten von $\Delta = 45^\circ$. Der sogenannte *Doppeldreher-Zyklus* ist mit einer Zykluslänge von $\phi = 90^\circ$ bzw. $\alpha_D = 4\phi$ halb so lang wie derjenige, der sich für den Wechsel zwischen Hellbild und Dunkelbild nach dem Malus-Gesetz ergibt. Diese im folgenden *Malus-Zyklus* genannte Helligkeitscharakteristik mit dem räumlichen Drehwinkel von $\phi = 180^\circ$ und folglich dem Zykluswinkel von $\alpha_M = 2\phi$ bildet bezüglich der weiteren Beobachtungen eine Art Helligkeitsnormal.

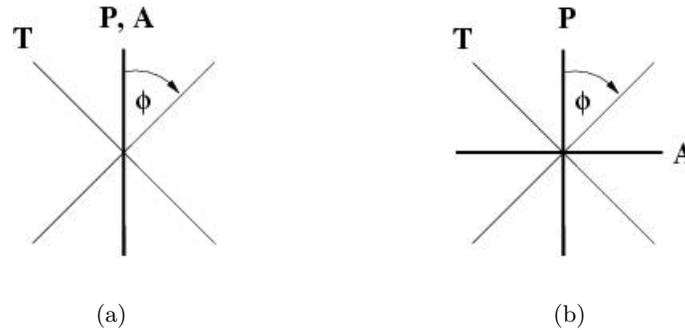


Abbildung 20.5: Drehung von T zwischen A und P mit $A \parallel P$ (a) und $A \perp P$ (b).

Die Bildzustände der beiden Doppeldreher-Zyklen in Abbildung 20.3 werden nun durch einen Analysator A betrachtet. Dabei ergeben sich mit zunehmender Schichtdicke δ von T zwei Bildfolgen: eine für *parallele* Richtungen A und P , d.h. ausgehend vom Hellbild des Malus-Zyklus, und eine für *gekreuzte* Richtungen A und P , d.h. ausgehend vom Dunkelbild.

Als Transformator $T(\phi, \delta)$ wird möglichst dünne, doppelbrechende Frischhaltefolie verwendet¹⁰. δ ist in diesem Fall die Anzahl solcher mit gleicher Hauptachsenlage geschichteter Frischhaltefolien.

Bei den Abbildungen 20.6 und 20.7 handelt es sich jeweils um die Überlagerung zweier Zyklen: Der horizontale ist durch den Drehwinkel ϕ bzw. den Zyklus-Winkel $2\alpha_D$, der vertikale

¹⁰Je dünner die Folie ist, desto feiner ist die Auflösung der Zwischenzustände eines Zyklus'. Die hier verwendete Folie ist so ausgesucht, dass die Zyklusmitte relativ exakt mit einer geraden Anzahl von Schichten zusammenfällt.

$[A, T(\phi, \delta), P]$ für $A \parallel P$:

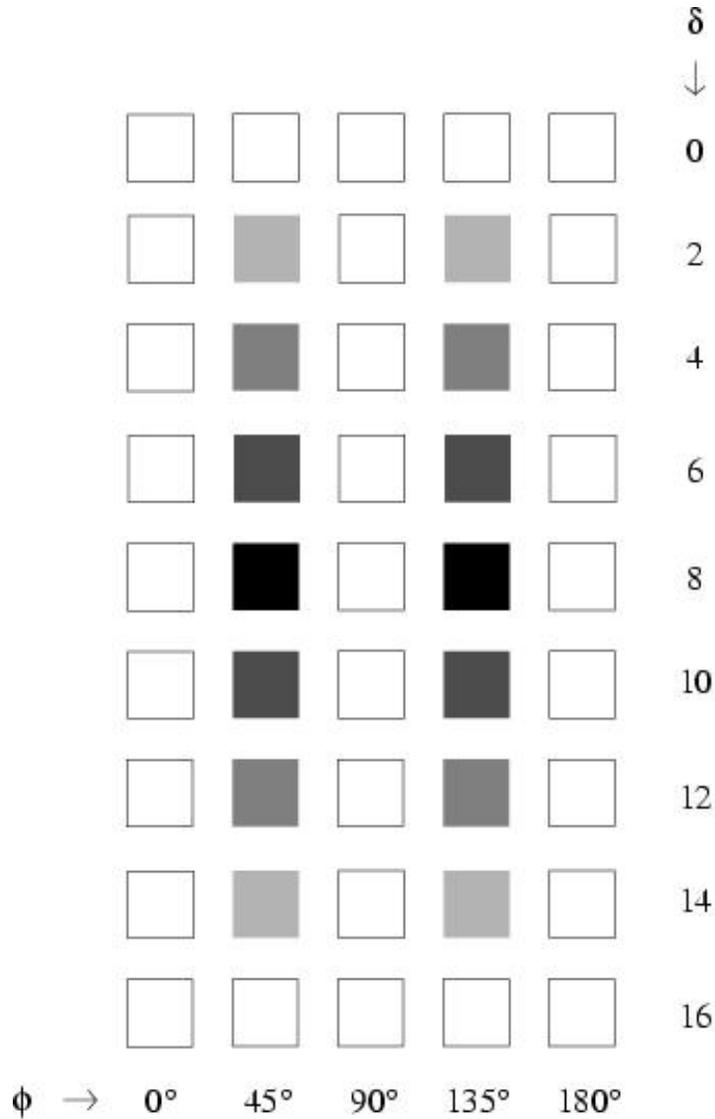


Abbildung 20.6: Überlagerung von Doppeldreher- und Schichtenzyklus, ausgehend vom Hellbild.

durch die Schichtdicke δ parametrisiert. In den Stellungen von $T(\phi, \delta)$ mit $\phi = n \cdot 90^\circ$, den *entspannten* Bildzuständen, geht das Bild, unabhängig von der Folienanzahl δ , jeweils in das Hellbild (Dunkelbild) des Malus-Zyklus' über. Das Bild ist für $[A, T(n \cdot 90^\circ, \delta), P]$ sozusagen *unempfindlich* gegen den Transformator: Es bleibt als Bild des Malus-Zyklus' erhalten. Die Linien, auf denen solche Bilder liegen, nennen wir deshalb Erhaltungs- bzw. *Malus-Linien*.

Im Gegensatz dazu zeigt sich für die Zwischenstellungen mit $\phi = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$, d.h. für die *angespannten* Bildzustände, mit zunehmender Folienanzahl δ eine Abweichung vom Hellbild (Dunkelbild): Mit acht Transformator-Folien erleidet das Hellbild eine Abdunkelung bis zum

$[A, T(\phi, \delta), P]$ für $A \perp P$:

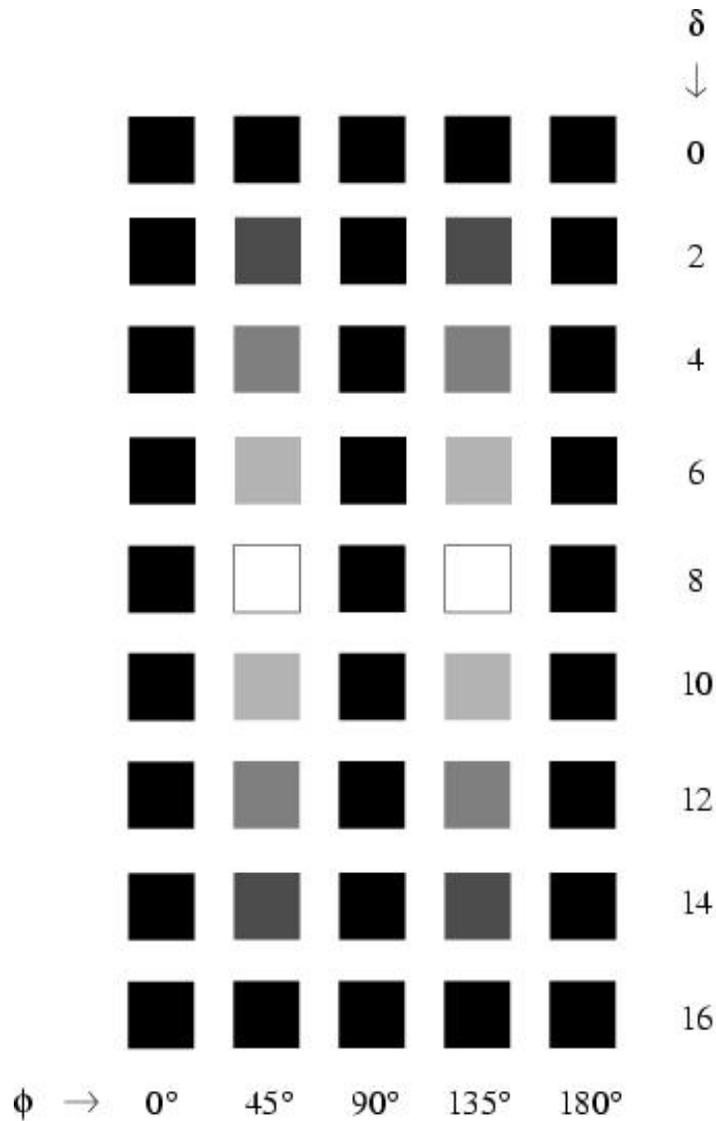


Abbildung 20.7: Überlagerung von Doppeldreher- und Schichtenzyklus, ausgehend vom Dunkelbild.

Dunkelbild, das Dunkelbild eine Aufhellung bis zum Hellbild. Die "Interpretation" der angespannten Bildzustände durch δ wird mit acht Folien sozusagen maximal.¹¹ Mit weiteren acht Folien gehen beide Bilder wieder in ihre Ausgangszustände über und der *Doppeldreherzyklus* beginnt von neuem.

¹¹Die Wirkung der Schichtdicke als "Interpretation" des angespannten des Zustandes aufzufassen, geschieht im Ausblick auf die mit natürlicher Beleuchtung auftretenden *Farben*. Die Entartung der symmetrisch zu der Zyklusmitte liegenden, gleich hellen Bilder in den Abbildungen 20.6 und 20.7 wird damit aufgehoben: Der Übergang des Hellbildes in das Dunkelbild geht in unserem Fall für $\delta = 0 \rightarrow 16$ Schichten über Abdunkelfarben gelb \rightarrow rot (\rightarrow undurchsichtig); derjenige des Dunkelbildes in das Hellbild über Aufhellfarben violett \rightarrow blau (\rightarrow durchsichtig). Die den Abbildungen 20.6 und 20.7 entsprechenden farbigen Bildreihen sind mit einem Kommentar im Anhang beigefügt.

Es gibt damit zwei Wege, die Wirksamkeit von T auf den Bildzustand zu ermöglichen: *Kontinuierlich*: Drehung von T mit einer bestimmten Schichtdicke δ_0 aus einem entspannten in einen angespannten Bildzustand: $\phi = n \cdot 90^\circ \rightarrow (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$. *Diskret*: Erhöhen der Folienanzahl δ in einem angespannten Zustand, z.B. bei $\phi = 45^\circ$.

20.5 Polarisationszustände

Nach der Betrachtung des Wechsels zwischen entspannten und angespannten Zuständen im Bild des Doppeldreher-Zyklus erhebt sich die Frage, wie sich für gegebene Winkel φ_P zwischen P und T der Polarisationszustand des durch $[T, P]$ gesehenen Bildes mit zunehmender Schichtdicke δ ändert.¹² Wie im vorangegangenen Abschnitt soll sich das im Bild einer Helligkeitscharakteristik ergeben, die durch den Drehwinkel φ_A eines Analysators bzw. einen Zyklus-Winkel α parametrisiert ist.

Für $\varphi_P = n \cdot 90^\circ$, d.h. für die entspannten Zustände haben wir die Frage im letzten Abschnitt bereits beantwortet: Das Bild ist unempfindlich gegenüber T ; der Malus-Zyklus ist erhalten. Für die angespannten Zustände mit $\varphi_P = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$ ergibt sich die in Abbildung 20.8 auf der nächsten Seite dargestellte Bildfolge. Der Analysator wird dabei für jede Schichtdicke δ einmal um $\varphi_A = 180^\circ$ gedreht.

Auffallend in Abbildung 20.8 auf der nächsten Seite sind zunächst die Malus-Linien für $\varphi_A = 90^\circ, 180^\circ$. Das sind Stellungen, in denen A mit einer Hauptachse von T zusammenfällt. Aus der umgekehrten Sicht: $[P, T, A]$ ¹³, d.h. bezüglich $[T, A]$ sind das entspannte Zustände. In Abbildung 20.8 zeigt sich damit der gleiche Rhythmus wie in den Abbildungen 20.6 und 20.7. Dadurch allerdings, dass nicht Hell- oder Dunkelbilder erhalten sind, sondern T für die *Diagonalstellung* von A und P , d.h. für den halbhellen/halbdunklen Mittelzustand des Malus-Zyklus' unwirksam wird, zeigt sich noch etwas Neues:

T wirkt mit zunehmender Schichtdicke offenbar so, dass die Ausprägung der Hell- und Dunkelbilder in den angespannten Zuständen $\varphi_A = 45^\circ, 135^\circ$ und 225° immer schwächer wird, bis bei vier Folien die Malus-Charakteristik ganz aufgehoben ist: Die ausgeglichene Bildhelligkeit ist hier *invariant unter Drehungen des Analysators*. Mit weiter zunehmender Schichtdicke kehren Hell- und Dunkelbild über Zwischenzustände zurück, aber für jeweils senkrechte Stellungen von A : bei $\varphi_A = 45^\circ, 225^\circ$ das Dunkelbild und bei $\varphi_A = 135^\circ$ das Hellbild (Abbildung 20.6; für Abbildung 20.7 gelten entsprechend umgekehrte Verhältnisse). Bezüglich der Ausgangsbilder sind Hell- und Dunkelbild also vertauscht. Das ist für acht Folien der Fall und wir sind in

¹²Es wird angestrebt, die Definition von *elliptischen* und *zirkularen* Polarisationszuständen ebenfalls auf charakteristische Helligkeitsänderungen des Bildes in Abhängigkeit von der Analysatorstellung abzustützen (vgl. [Dus97]).

¹³Darin, dass es auch für $\varphi_P = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$ Malus-Linien gibt, macht sich die Symmetrie des Ensembles $[A, T, P]$, d.h. die Umkehrbarkeit der Blickrichtung geltend. Es gilt: $[A, T, P] = [P, T, A]$.

$[A(\varphi_A), T(\delta), P(\varphi_P = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ))], \varphi_A = 45^\circ \rightarrow 225^\circ$:

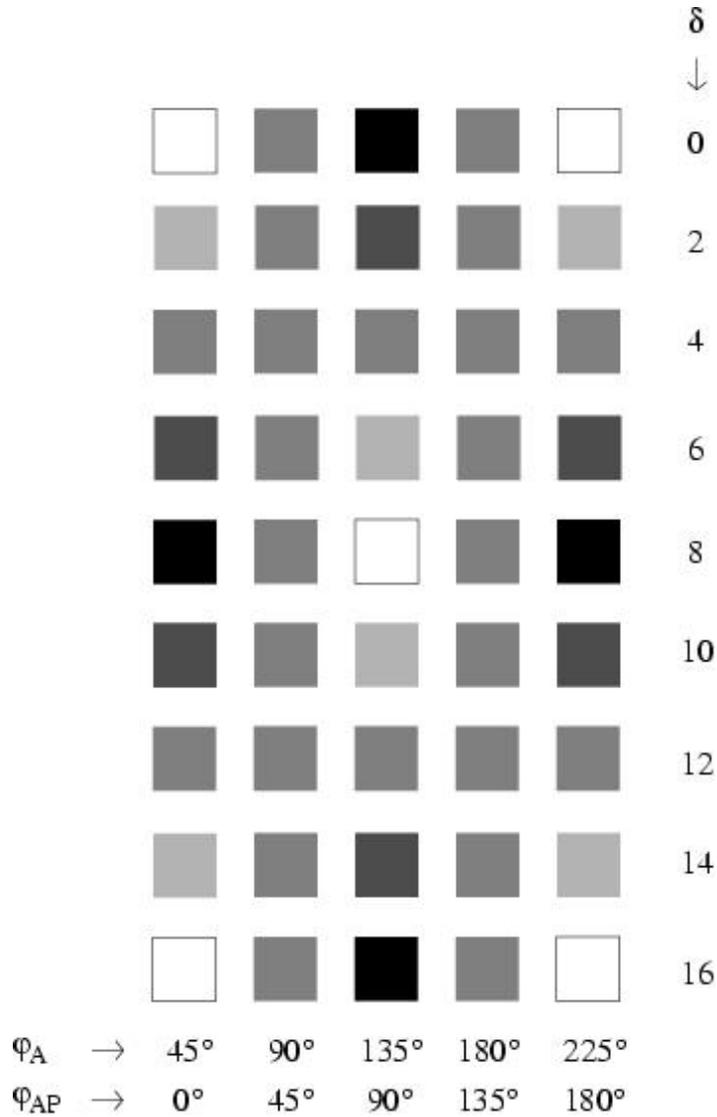


Abbildung 20.8: Überlagerung von Malus- und Schichten-Zyklus, ausgehend vom Hellbild.

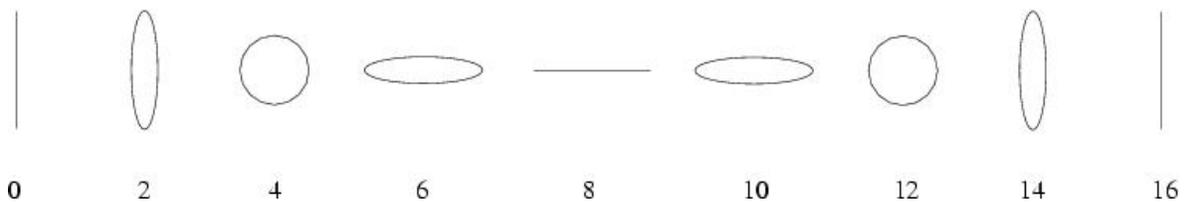
der Mitte des Zyklus' angekommen. Weitere Schichten liefern das Spiegelbild des bisherigen Verlaufes: Bei zwölf Schichten zeigt sich ein zweites Mal die Unempfindlichkeit des Bildes für Variationen von φ_A . Weitere vier Schichten geben den Übergang in den Malus-Zyklus, von dem wir ausgingen.

Linear polarisiert nennen wir ein Bild, wenn es eine Polarisationsfolie und eine spezielle Orientierung der Hauptachse A derselben gibt, so dass das Bild vollständig abgedunkelt erscheint. Die zugeordneten Haidinger-Büschel stehen dann senkrecht zueinander, d.h. die Hauptachse der Folie fällt mit der Blairichtung des Bildes zusammen. Diese wird als Polarisationsrichtung

des Bildes bezeichnet. Die Helligkeitseigenschaften eines linear polarisierten Bildes bezüglich eines Analysators sind also gerade diejenigen des Malus-Zyklus' [Dus97].

Zirkular polarisiert nennen wir ein Bild, das aus einem linear polarisierten durch Änderung der Schichtdicke eines Transformators hervorgeht und dessen Helligkeit für beliebige Stellungen eines Analysators erhalten ist.

Die Übergangszustände zwischen linearen und zirkularen Zuständen nennen wir *elliptisch*. In diesem Sinne durchläuft der vertikale Zyklus von Abbildung 20.8 eine Folge von Polarisationszuständen, die sich in Abhängigkeit von der Folienanzahl folgendermaßen schematisch darstellen lässt:



Zur Unterscheidung der zirkularen Zustände für vier und zwölf Folien bietet sich die Einführung eines Drehsinnes an: Je nach Definition sind dann die elliptischen und zirkularen Zustände der ersten Zyklushälfte *rechtsdrehend*, diejenigen der zweiten Zyklushälfte *linksdrehend*.

Auf die Möglichkeit der geometrischen Zustandsdarstellung mit Hilfe der *Poincaré-Kugel* und die mathematische Beschreibung von Polarisationszuständen und Transformationen durch *Stokes-Parameter* und *Jones-* bzw. *Mueller-Matrizen* sei hier nur hingewiesen [Bro98, Col93, Dus97, Shu62].

Bisher hat es genügt, das Maß der Doppelbrechung von T mit der Schichtenanzahl δ bzw. der Brechzahldifferenz Δ in Zusammenhang zu bringen: $\Delta \sim d(n_a - n_o)$ mit d : gemessene Schichtdicke von T . Die geschilderten Beobachtungen haben nun gezeigt, dass sich Abweichungen vom Malus-Gesetz in Abhängigkeit von der Folienanzahl *wiederholen*, d.h. dass δ einen *Zyklus* parametrisiert, der in unserem Falle (*rotes Hellbild*) aus 16 Transformator-Folien besteht. Um δ durch eine *Zykluszahl* ε zu ersetzen, schreiben wir: $\varepsilon_{\text{rot}} \sim 2\pi n/16$, n : Folienanzahl. Für Beobachtungen, die von einem *grünen Hellbild* ausgehen, schließt sich der Zyklus bereits nach 14 Folien. Es ergibt sich: $\varepsilon_{\text{grün}} \sim 2\pi n/14$. Bezogen auf einen Folientypus heißt das:

Verschiedenfarbige Zyklen sind unterschiedlich lang.

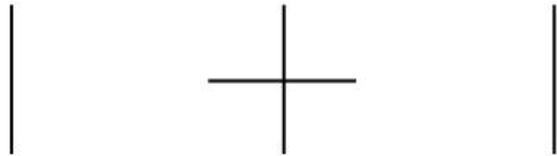
Das jeweilige Verhältnis der für einen Schichten-Zyklus benötigten Schichtdicke zum vollen Zykluswinkel: $d_{\text{Farbe}}/2\pi$ liefert eine charakteristische Referenzlänge l , die sich als Maßstab eignet. Sie ist ferner ein Vielfaches der jeweiligen Wellenlänge λ und damit eine Eigenschaft der verwendeten Leuchte.

Zusammenfassend ergibt sich für die räumlichen Bedingungen, unter denen die Doppeldrehung der Transformator-Folien in der untersuchten Weise wirksam wird, der als Phase ge-läufige Ausdruck:

$$\delta = \frac{2\pi d}{l}(n_a - n_o).$$

20.6 Die Helligkeitsfunktion

In Abschnitt "Polarisation und Skalarprodukt" wurde gezeigt, wie sich mit Hilfe des Skalarproduktes die Bildhelligkeit für das optische Ensemble $[P, A]$ als Funktion des Winkels zwischen den Gelrichtungen des Polarisators und Analysators ausdrücken lässt. Die Anwendung dieses Ansatzes auf das Ensemble $[P, T, A]$ führt im Folgenden auf einen analytischen Ausdruck für die Bildhelligkeit I als Funktion der Winkel φ_P und φ_A zwischen P und T bzw. T und A und der Schichtdicke δ von T : $I(\varphi_P, \varphi_A, \delta)$. Dazu wird P auf T und in einem zweiten Schritt T auf A bezogen:

$$P(\varphi_P) \quad \rightarrow \quad T(\delta) \quad \rightarrow \quad A(\varphi_A)$$


Weil T *doppelbrechend* ist, muss das Skalarprodukt dabei jeweils doppelt ausgeführt werden: \mathbf{e}_p wird auf \mathbf{e}_{t1} und \mathbf{e}_{t2} projiziert und liefert Achsenabschnitte t_1 und t_2 , die dann ihrerseits auf \mathbf{e}_a projiziert werden. Die Gewichtung einer der Achsen t_i mit einem komplexen Phasenfaktor, der die Schichtdicke δ enthält, trägt dem jeweiligen *Maß* der Doppeldrehung Rechnung.¹⁴

Die Ausführung der Skalarprodukte liefert:

$$P(\varphi_P) \rightarrow T:$$

$$t_1 = \cos \varphi_P$$

$$t_2 = \sin \varphi_P e^{-i\delta}$$

$$T \rightarrow A(\varphi_A):$$

$$a_1 = \cos \varphi_P \cos \varphi_A \tag{20.1}$$

$$a_2 = \sin \varphi_P \sin \varphi_A e^{-i\delta} \tag{20.2}$$

¹⁴Welche tiefere Bedeutung es hat, dass in der Berechnung der Helligkeit ein komplexer Phasenfaktor vorkommt, bedarf einer ausführlicheren Erörterung, die hier nicht gegeben werden kann. Zu untersuchen wäre u.a., ob die Äquivalenz der hier gegebenen Ableitung der Helligkeitsfunktion zu einer entsprechenden mit komplexen Jones-Vektoren gezeigt werden kann.

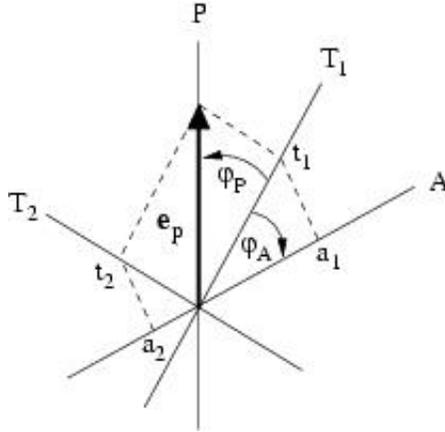


Abbildung 20.9: Hintereinanderausführung der vier Skalarprodukte.

Das Produkt $(a_1 + a_2)(a_1 + a_2)^*$ ist ein Maß für die Helligkeit des Bildes:

$$(a_1 + a_2)(a_1 + a_2)^* =: I \quad (20.3)$$

Einige Umformungen, die im Anhang aufgeführt sind, liefern mit (20.1) und (20.2) für (20.3):

$$I(\varphi_P, \varphi_A, \delta) = I_0 \cos^2(\varphi_A - \varphi_P) - I_0 \sin 2\varphi_P \sin 2\varphi_A \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (20.4)$$

Darin ist I_0 die normierte Helligkeit des durch $[A, P]$ für $A \parallel P$ gesehenen Hellbildes. Mit $\varphi_A - \varphi_P = \phi$ ist rasch zu überschauen, dass der in den vorangegangenen Abschnitten untersuchte Helligkeitswandel für das Ensemble $[A, T, P]$ richtig beschrieben wird:

$$I(\varphi_P, \phi, \delta) = I_0 \cos^2 \phi - I_0 \sin 2\varphi_P \sin 2(\phi + \varphi_P) \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (20.5)$$

Der erste Term der rechten Seite von (20.5) sei im Folgenden mit (20.5a), der zweite mit (20.5b) bezeichnet. Der Einfachheit halber setzen wir δ als Zykluszahl ε an: $\varepsilon = 2\pi n/16$. Für $n = 0$, d.h. ohne Transformator, sowie für ganzzahlige Vielfache von 16 verschwindet (20.5b): (20.5) nimmt mit (20.5a) die bekannte Gestalt des Malus-Gesetzes an. Für halbzahlige Vielfache der Zyklusschichtdicke wird (20.5b) und damit die Abweichung von der Malus-Charakteristik maximal: Das ursprüngliche Hellbild kann zum Dunkelbild und dieses zu jenem werden.

Wie stark bei einer gegebenen Folienanzahl der Transformator wirksam wird, hängt von seiner Hauptachsenlage ab: Für parallele und senkrechte Stellungen zu A oder P , d.h. für $\varphi_P = n \cdot 90^\circ$ bzw. $\varphi_A = n \cdot 90^\circ$, bleibt er unwirksam: (20.5b) verschwindet, die Malus-Charakteristik ist mit (20.5a) erhalten. Maximal dagegen wird die Wirksamkeit des Transformators in den Diagonalstellungen mit $\varphi_P = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$ bzw. $\varphi_A = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ)$: Die Verdopplung

von φ_P und φ_A in den Sinusfunktionen von (20.5b) spiegelt die Frequenz des Doppeldreher-Zyklus'.

Danksagung

Diese Arbeit ist Mario Howald-Haller (†) gewidmet. David Auerbach und Ernst-August Müller (†) haben mich mit dem Phänomen der Doppeldrehung bekannt gemacht. Gründliche Kritik des Manuskriptes und zahlreiche weiterführende Anregungen erhielt ich von Friedrich Wilhelm Dustmann, Johannes Kühl und Wilfried Sommer. Den Sinn für die Blickrichtung einer Optik der Bilder habe ich mir an den Arbeiten Manfred von Mackensens, Georg Maiers und Heinz-Christian Ohlendorfs bilden können. Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Anhang

A1:

Die in den Abbildungen auf den nächsten Seiten wiedergegebenen Farben sollen annäherungsweise denjenigen entsprechen, die sich für den ersten Zyklus, d.h. für Schichtdicken von 0 bis 16 Folien ergeben.¹⁵ Üblicherweise wird die optische Dicke des Transformators in Einheiten der Wellenlänge λ angegeben. Die Ordnungen der auftretenden Farbfolgen entsprechen dabei den hier mit δ parametrisierten Zyklen [BS93].

A2:

Die Ausführung von (20.3) liefert

$$\begin{aligned} I &= \left(\cos \varphi_P \cos \varphi_A + \sin \varphi_P \sin \varphi_A e^{-i\delta} \right) \cdot \left(\cos \varphi_P \cos \varphi_A + \sin \varphi_P \sin \varphi_A e^{i\delta} \right) \\ &= \left(\cos^2 \varphi_P \cos^2 \varphi_A + \sin^2 \varphi_P \sin^2 \varphi_A + 2 \cos \varphi_P \cos \varphi_A \sin \varphi_P \sin \varphi_A \cos \delta \right) \end{aligned} \quad (20.6)$$

Mit

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$$

und

$$\sin 2\alpha = 2 \cos \alpha \sin \alpha$$

sowie

$$\cos \alpha = 1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

erhalten wir für (20.6)

$$I(\varphi_P, \varphi_A, \delta) = I_0 \cos^2(\varphi_A - \varphi_P) - I_0 \sin 2\varphi_P \sin 2\varphi_A \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

$I_0 = 1$ beschreibt die Intensität des Hellbildes ($A \parallel P$)

Literaturverzeichnis

- [Bro98] BROSSÉAU, C. *Fundamentals of Polarized Light. A statistical optics approach.* 1998
- [BS93] BERGMANN, L. ; SCHÄFER, C. ; NIEDRIG, Heinz (Hrsg.): *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 3: Optik.* Berlin : de Gruyter, 1993
- [Col93] COLLETT, E. *Polarized light – fundamentals and applications.* 1993

¹⁵Wir betonen deshalb, dass es sich hier um die Farben des ersten Zyklus handelt, weil sich die Farben nicht *wiederholen*, so wie sich auch die Farben des Regenbogens in seinen Nebenbögen nicht wiederholen. Die Farben führen vielmehr heraus aus der zyklischen Abgeschlossenheit der betrachteten Bildfolgen. Sie führen damit heraus aus der Form von Berechenbarkeit, die in der Helligkeitsfunktion zum Ausdruck kommt. Darin besteht schließlich einer der Hauptgründe, weshalb sie hier nicht eigentlich behandelt wurden.

- [Dus97] DUSTMANN, F. W. *Die optische Polarisation*. Unveröffentlichtes Manuskript. 1997
- [Hai44] HAIDINGER, W. K.: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. In: *Poggendorf Annalen* 63 (1844), S. 29–39
- [Hai46] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel auf Flächen, welche das Licht in zwei senkrecht aufeinander stehende Richtungen polarisieren. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 305–319
- [Hec99] HECHT, E.: *Optik*. Bonn : Addison-Wesley, 1999
- [How64] HOWALD-HALLER, M.: Doppelspat und Polarisation. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 1 (1964), S. 12–14
- [Jon41] JONES, R. C.: A new calculus for the treatment of optical systems. In: *Journal of the Optical Society* 31 (1941), S. 488–503
- [Mai70] MAIER, G.: Die Elemente als Stufen der Naturbetrachtung. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 13 (1970), S. 1–9
- [Prö98] PRÖBSTL, A.: Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. In: *Elemente der Naturwissenschaften* 68 (1998), Nr. 2, S. 1–26
- [Shu62] SHURCLIFF, W. A. *Polarized Light*. 1962

$[A, T(\phi, \delta), P]$ für $A \parallel P$:

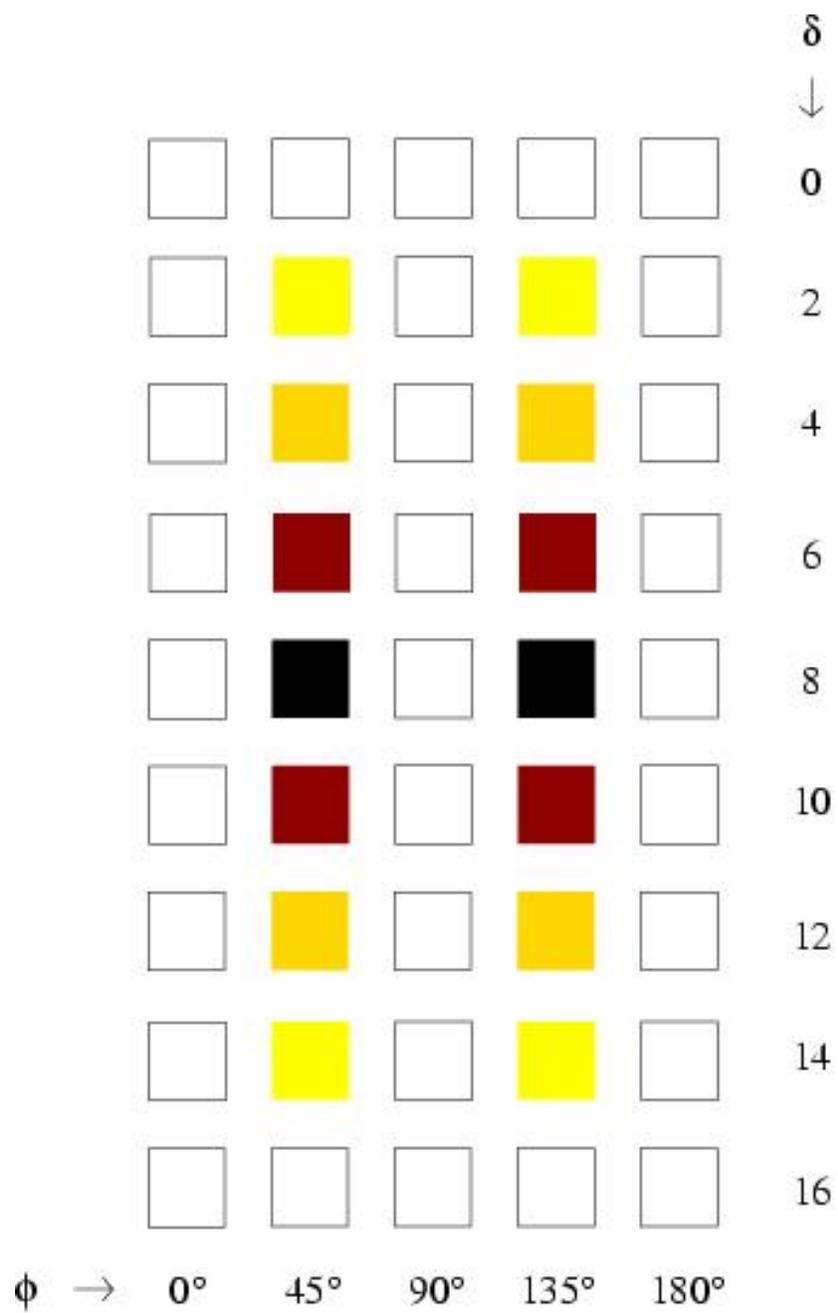


Abbildung 20.10: Vgl. Abbildung 20.6 auf Seite 191.

$[A, T(\phi, \delta), P]$ für $A \perp P$:

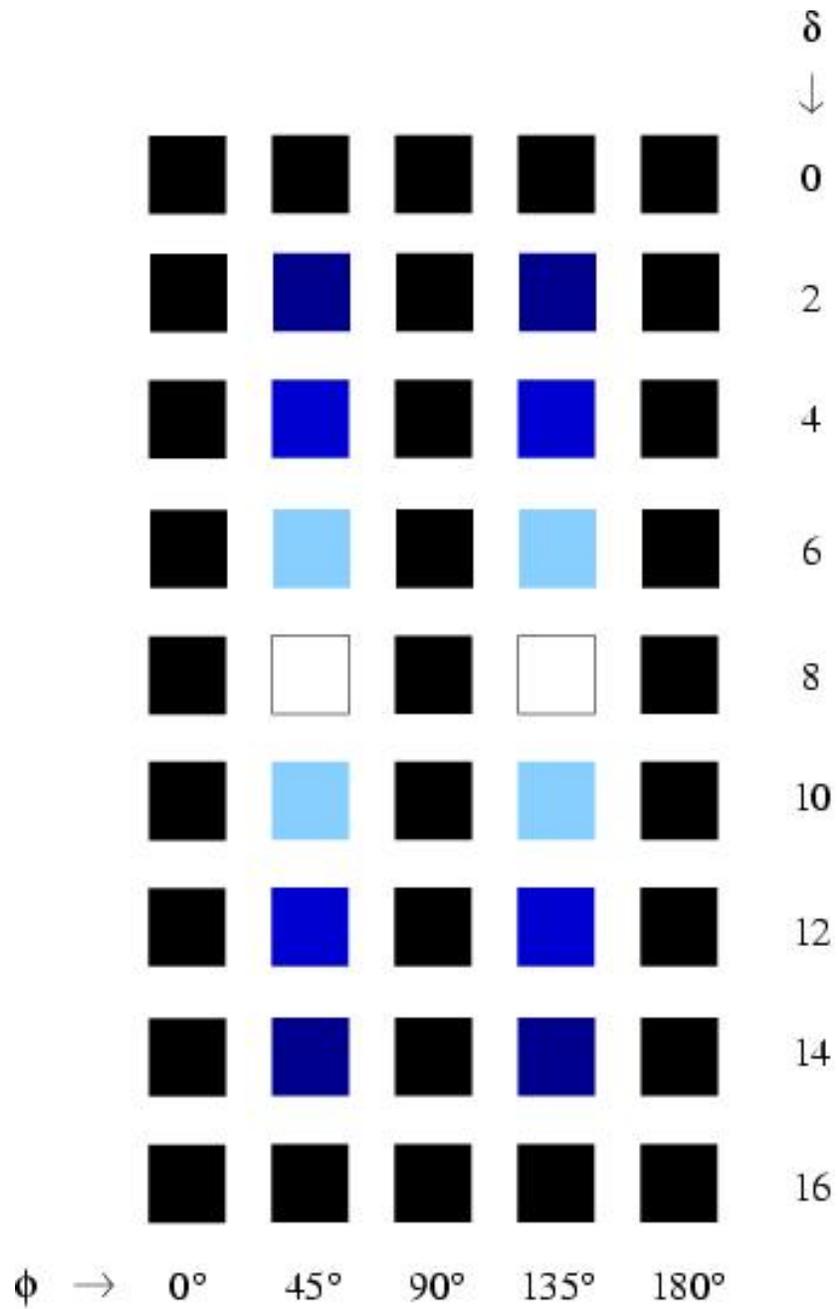


Abbildung 20.11: Vgl. Abbildung 20.7 auf Seite 192.

$[A(\varphi_A), T(\delta), P(\varphi_P = (n \cdot 90^\circ + 45^\circ))], \varphi_A = 45^\circ \rightarrow 225^\circ:$

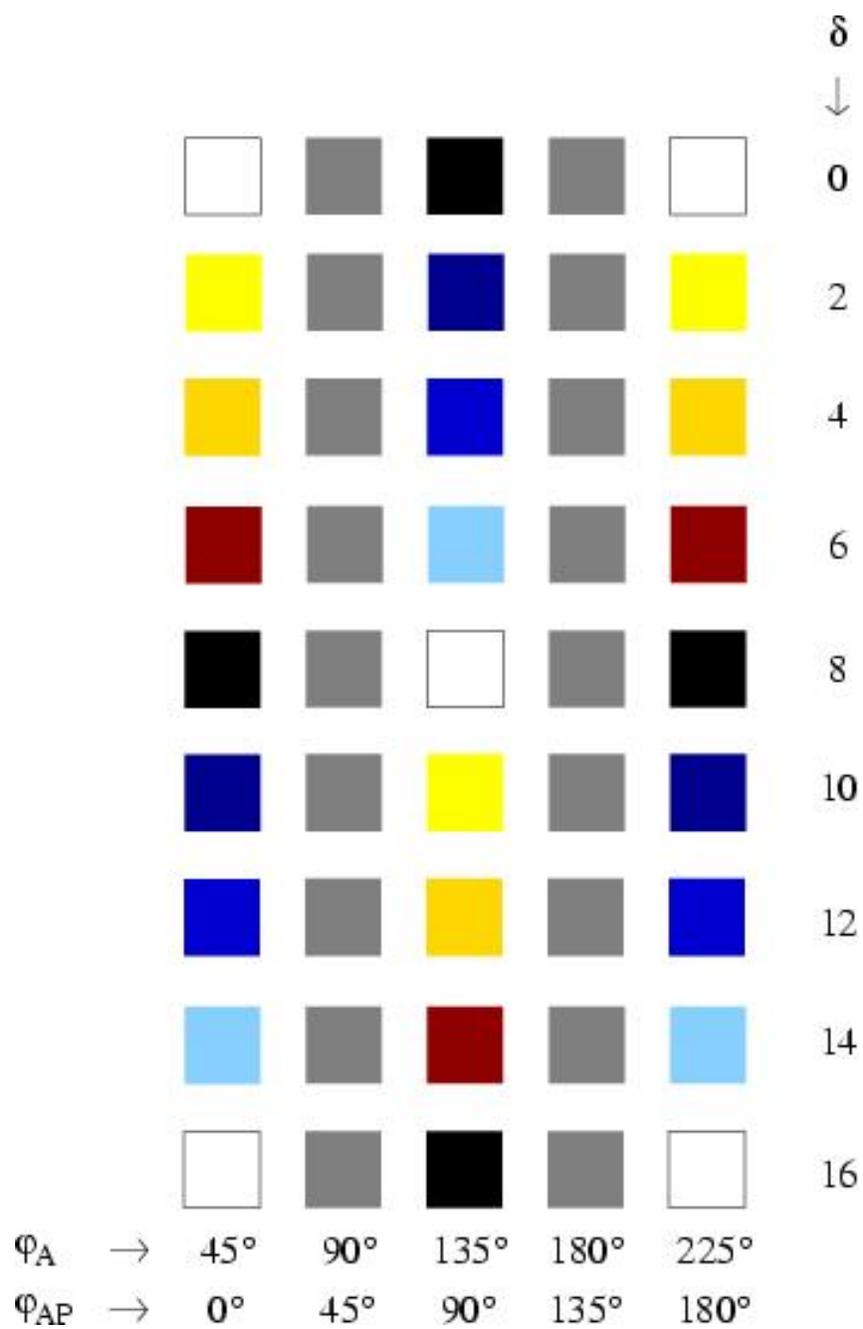


Abbildung 20.12: Vgl. Abbildung 20.8 auf Seite 194.

Veröffentlichung 21

Exakte Phänomenologie der Polarisation

Johannes Grebe-Ellis

(Vortrag auf der Frühjahrstagung der DPG in Augsburg 2003)

Einleitung – Historische Vorbemerkung

Als A. Fresnel und D.F.J. Arago im Jahre 1817 auf ihre Experimente zur Interferenzfähigkeit von Licht zurückblickten und Fresnel ihre Arbeit krönen wollte durch eine mathematische Formulierung der gefundenen Interferenzgesetze, machte er die überraschende Entdeckung, dass er dazu nicht in der Lage war. Dem Hinweis Th. Youngs hatten sie verdankt, dass das Ausbleiben von Interferenz bei der Überlagerung orthogonal polarisierter Wellenzüge interpretierbar wurde als Nachweis der *Transversalität* des Lichtwellenfeldes. Voraussetzung für die mathematische Beschreibbarkeit dieses Ergebnisses war, dass Fresnel von einer bereits polarisierten Lichtquelle ausgehen konnte. Dies konnte allerdings für den zweiten Teil seiner Ergebnisse gerade nicht vorausgesetzt werden. Diese verlangten vielmehr, die unpolarisierte Lichtquelle seiner Versuchsanordnung in die mathematische Beschreibung mit einzubeziehen. Dies führte ihn zu der bemerkenswerten Feststellung, dass er im Rahmen der Amplitudendarstellung des Lichtes über keinen Ausdruck für unpolarisiertes oder auch nur teilpolarisiertes Licht verfügte. Damit war aber in einem gewissen Maße die Natur der bisherigen Deutung optischer Erscheinungen, die im wesentlichen aus dem Rückgriff auf mechanische Analogien bestand, *als solche* in Frage gestellt. Eine Lösung des Problems musste aus einer grundsätzlichen Überprüfung des Verhältnisses von Theorie und Experiment, d.h. von hypothetischen Größen und Vorgängen einerseits, und den tatsächlichen Messgrößen andererseits hervorgehen.

Den Ansatz für eine solche Lösung lieferte Sir G.G. Stokes in seiner 1852 veröffentlichten Schrift *On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources* [Sto01]. Stokes hatte sich darin die mathematische Beschreibung unpolarisierter bzw. teilpolarisierter Lichtbündel zum Ziel gesetzt. Dies gelang ihm durch die Einführung von vier Parametern, die als lineare Funktionen der Intensität der jeweils untersuchten Lichtquelle echte Observablen waren. Diese *experimentelle Definition* des Polarisationszustandes einer Lichtquelle blieb aber lange unbeachtet und unerkannt. Die allgemeinen Bestrebungen der Physik des 19. Jahrhunderts richteten sich darauf, "die Ursache aller natürlichen Wirkungen auf mechanische Gründe zurückzuführen" [Huy96]. Diesem Paradigma konnte in der Optik nur durch mechanische Analogien bzw. Modelle entsprochen werden. Ferner stand die Erfolgsgeschichte der Wellentheorie mit Young und Fresnel erst an ihrem Beginn, nachdem die brillanten Ideen von Huygens unter dem Gewicht des Newtonschen Dogmas über hundert Jahre hinweg nur wenige Anhänger gefunden hatten. Erst die Hinwendung zu der Frage nach den Bedingungen der prinzipiellen Beobachtbarkeit physikalischer Größen im Rahmen der Quantentheorie zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat die Aufgabe des reduktionistisch-spekulativen Paradigmas regelrecht erzwungen [Wei90a].

Wiederentdeckt wurde der Ansatz von Stokes in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts von S. Chandrasekhar [Cha60]. Die Arbeit mit Stokes-Parametern hat seither zunehmende Verbreitung gefunden. Die Entwicklung der im Zusammenhang des hier vorgestellten Vorgehens benutzten Matrixdarstellung optischer Transformationen geht auf Mueller und andere zurück [Shu62].

21.1 Zur Phänomenologie der Polarisation

Ein Anknüpfungspunkt in diesem historischen Hintergrund für die Perspektive einer Phänomenologie der Polarisation wird in Folgendem gesehen: Das Scheitern Fresnels an der Aufgabe, in den Begriffen der Amplitudendarstellung des Lichts unpolarisiertes Licht zu beschreiben, wurde u.a. zum Anlass, sich zu vergegenwärtigen, dass man im Rahmen der Wellenoptik mit unbeobachtbaren Größen operierte: Frequenz, Wellenlänge, Amplitude und Phase.

Die Forderung, von solchen hypothetischen zu tatsächlich beobachtbaren Größen überzugehen, ist in der Physik im allgemeinen – man denke an den Deskriptionismus Berkeleys und Machs – , insbesondere aber in der Geschichte der Optik mehrfach erhoben worden. "... classical optics is not based on empirical laws but on a hypothesis, i.e., the wave theory. Since electric and magnetic fields of a light beam, its frequency and phase are *unobservable quantities*, the wave theory is not a logical foundation of optics..." [Mue48].

Die stärkste Herausforderung des reduktionistisch-spekulativen Paradigmas noch vor der Grundlagenkrise in der Physik zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellt wohl die Polemik Goethes gegen die Optik Newtons dar [Bor96].

Neuere Arbeiten zu einer streng hypothese-freien Optik, die sich auf die von Goethe [Goe81] geltend gemachte Methode einer *rationellen Empirie* beziehen, stammen von Maier [Mai86, Mai81, Mai84] und Mackensen [MO98]. Ferner sind von Schön, Erb und Werner Vorschläge für den Optikunterricht der Oberstufe entwickelt worden, die zeigen, wie mit Hilfe des *Lichtwegkonzepts* nach Fermat und des *Zeigerformalismus?* nach Feynman eine phänomenorientierte und zugleich einfache mathematische Beschreibung zahlreicher Erscheinungen gelingt, die ohne Festlegung des Lichtes auf Welle oder Teilchen auskommt [Sch93, ES97, Erb94, Wer00].

Im Kontext dieser Bestrebungen sind vom Verfasser für eine Phänomenologie der Polarisation einige erste Anmerkungen vorgelegt worden [Gre01, GE02b, GE01, GE02a]. Es wird der Versuch gemacht, die Erscheinungen zu beschreiben, ohne ihnen von vornherein die Bestätigung einer Theorie abzuverlangen, d.h. ohne sie auf eine jenseits des Erscheinungszusammenhangs vorgestellte Ebene ursächlicher Größen und Vorgänge abzubilden. Das ist gerade bei der Polarisation nicht einfach, weil man im allgemeinen gewohnt ist, Polarisationsexperimente so zu machen, dass die Ergebnisse gestatten, als Beweis für die Wellennatur des Lichts gedeutet zu werden. Manche Experimente werden deshalb neu angeschaut und die Art des Experimentierens selbst überdacht. In der Reihung verwandter Phänomene und der Untersuchung, welche Abwandlungen sich ergeben bei der Änderung der jeweils wirksamen Bedingungen, zeigen sich Ordnungen, die den Erscheinungen als Gesten immanent sind. Sich in solche Gesten einfühlen, mit den zugehörigen Erscheinungen vertraut werden, Sicherheit in der beobachtenden Teilnahme und im sich daran anschließenden Bedingungsurteil zu gewinnen – diese Anforderungen zeigen, wie hoch die Kultur der exakten und vorurteilsfreien Naturbeobachtung und damit die Rolle des Beobachters in dem hier vertretenen Ansatz bewertet wird. Damit ist aber die Brücke von der Ausübung zur Einübung der Phänomenologie geschlagen: In dem Zugeständnis an den Einzelnen, sich durch die Ausbildung seiner Auffassungsorgane einen tragfähigen Erkenntniszugang zu den Erscheinungen der Natur erwerben zu können, liegt das entscheidende didaktische Kriterium dieses Ansatzes. Diese Perspektive kann ein spekulativer Reduktionismus, der die Ursachen der Erscheinungen aus dem Horizont des Wahrnehmbaren herausrückt und in jenseits der Wahrnehmbarkeit vorgestellten Mechanismen sucht, nicht eröffnen. Vielmehr ist für die auf diesem Weg gewonnenen Erkenntnisse die Unterdrückung des Beobachters gerade konstitutiv [Wei90b].

21.2 Operationale Zustandsdefinition

Ein phänomenologisches Vorgehen in dem angedeuteten Sinne schließt eine mathematische Beschreibung der Beobachtungen nicht aus. Im Gegenteil: Es zeigt sich, dass eine operationale Definition der Polarisationszustände über Helligkeitsmessungen auf eine Zustandsmanigfaltigkeit führt, deren immanente Strukturmerkmale eine geometrische und algebraische Charakterisierung nahe legen. Auf die Darstellung der Polarisationszustände auf der Oberfläche der Einheitskugel nach H. Poincaré gehen wir weiter unten in einer Zwischenbemerkung ein.

Es soll im Folgenden skizziert werden, wie sich die von P. Soleillet, H. Mueller und anderen entwickelte Methode der Darstellung von Polarisationszuständen mit Stokes-Parametern und der Charakterisierung optischer Transformationen durch 4x4-Matrizen in den hypothesenfreien Ansatz einer Phänomenologie der Polarisation einfügt.

Wir gehen dazu zunächst von der Aufgabe aus, eine gegebene einfarbige Leuchte oder auch die Spiegelansicht eines schräg angeblickten Fensters auf ihren Polarisationszustand hin zu untersuchen. (Mit "Ansicht" ist der durch Helligkeit, Farbe, Kontrast und perspektivische Größe charakterisierbare, aktuelle Inhalt unseres Gesichtsfeldes als *Phänomenkomplex* gemeint.) Ein erster und einfachster Schritt zur Lösung dieser Aufgabe wird sein, eine gewöhnliche Polarisationsfolie zur Hand zu nehmen und das Helligkeitsverhalten der betreffenden Ansicht im Durchblick durch die Folie bei unterschiedlichen Winkelstellungen derselben zu prüfen. Verhält sich die Ansicht so, dass sie sich für eine bestimmte Stellung der Prüf-Folie vollständig auslöschen lässt und ihre Helligkeitsänderung als Funktion des Richtungswinkels dem *Malus-Gesetz* entspricht, sprechen wir von einem *linear polarisierten Zustand* der Ansicht [GE01, Dus97]. Wer im Durchblick durch die Prüf-Folie mit Hilfe des *Haidinger-Büschels* deren Hauptachsenlage bestimmt, der kann auch noch Aussagen zur jeweiligen Lage der Polarisationsrichtung machen [GE02a]. Beziehen wir diese Definition des linearen Polarisationszustands auf das Prüfmittel, so ergibt sich die Definition der Polarisationsfolie als *Linearpolarisator* bzw. *Linearanalysator*.

Fällt hingegen das Beobachtungsergebnis anders aus, beispielsweise so, dass die Helligkeit der betreffenden Ansicht *invariant* ist unter Drehungen des Linearanalysators, so könnte es sich um einen unpolarisierten oder einen zirkular polarisierten Zustand handeln. D.h. bezüglich des Linearanalysators als Prüfmittel sind diese Zustände entartet. Weitere Prüfmittel, z.B. doppelbrechende Folie, müssen herangezogen werden, um diese Entartung aufzuheben. Handelt es sich um einen zirkularen Zustand, bleibt eine weitere Unbestimmtheit, da es wegen der Geometrie von *Zirkularpolarisatoren* grundsätzlich zwei Möglichkeiten gibt, einen Zustand zu erzeugen, dessen Helligkeit bezüglich eines rotierenden Linearpolarisators invariant ist. Daraus folgt die Unterscheidung von *rechts-* und *linkszirkular* polarisierten Zuständen, etc.

Dieses Beispiel soll lediglich verdeutlichen, wie das Vorgehen einer operationalen Zustandsdefinition gedacht ist und dass, wenn von Polarisationszuständen die Rede ist, das charakteristische Helligkeitsverhalten einer Ansicht bezüglich verschiedener geordneter Prüfbeobachtungen gemeint ist. So verstanden beschreibt der Polarisationszustand einen *Bildzustand*.

Eine Zusammenfassung solcher Prüfbeobachtungen zur vollständigen Bestimmung des Polarisationszustandes und Polarisationsgrades einer gegebenen Lichtquelle oder Ansicht liefert der

folgende Satz von Stokes-Parametern:

$$S_0 = I_H + I_V \quad (21.1)$$

$$S_1 = I_H - I_V \quad (21.2)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (21.3)$$

$$S_3 = I_R - I_L \quad (21.4)$$

Die I_x sind Helligkeitswerte, die mit verschiedenen Prüfmitteln in unterschiedlichen Stellungen beobachtet bzw. gemessen werden. So ist beispielsweise I_H die Helligkeit der Ansicht im Durchblick durch einen Linearanalysator mit horizontaler Polarisationsrichtung und I_V die Helligkeit bei *gekreuzter*, also vertikaler Analysatorstellung. In den Diagonalstellungen des Linearanalysators ergeben sich I_{45} und I_{135} . I_R und I_L werden mit Rechts- bzw. Linkszirkularanalysatoren gemessen. Diese sind aufgebaut aus Kombinationen eines doppelbrechenden Transformators und einem Linearanalysator. Der doppelbrechende Transformator ist dabei der zu untersuchenden Ansicht zugewandt, dann folgt der Linearanalysator; diese Reihenfolge ist nicht vertauschbar. Man transformiert damit den zirkularen Zustand in einen linearen und analysiert diesen mit dem folgenden Linearanalysator. Dies hat den Vorteil, dass man auch zirkulare bzw. elliptische Zustände über die *Null-Intensität-Methode*, d.h. über das Malus-Gesetz sehr genau bestimmen kann.

Mit diesen Beobachtungs- bzw. Messvorschriften können die Definitionen (21.1) bis (21.4) folgendermaßen gelesen werden: S_0 ist die Gesamthelligkeit der Ansicht. Sie ergibt sich aus der Summe der Helligkeitswerte für horizontale und vertikale Stellungen des Linearanalysators. Im allgemeinen werden die Parameter als normierte Größen angesetzt. Dann gilt $S_0 = 1$ und für S_1 , S_2 und S_3 , je nach Polarisationszustand, $1 \geq S \geq -1$. Damit zeigt S_1 die Tendenz zu einem horizontal ($S_1 = 1$) bzw. vertikal ($S_1 = -1$) linear polarisierten Zustand. Für $S_1 = 0$ kann es sich um einen diagonal linearen, elliptischen, zirkularen oder unpolarisierten Zustand handeln. Dies wird durch die Parameter S_2 und S_3 festgelegt. So zeigt S_2 die Tendenz zu einem diagonal linear polarisierten Zustand mit Polarisationsrichtung unter 45° ($S_2 = 1$) bzw. 135° ($S_2 = -1$). S_3 schließlich misst die Elliptizität des Zustands und liefert $S_3 = 1$ für einen rechtszirkularen und $S_3 = -1$ für einen linkszirkularen Zustand.

Ist der Satz Stokes-Parameter $\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ zu einer gegebenen Ansicht bekannt, so ist deren Polarisationszustand vollständig bestimmt. Für vollständig polarisierte Zustände gilt insbesondere:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (21.5)$$

Für *teilmolarisierte* Zustände gilt folglich:

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (21.6)$$

Der *Polarisationsgrad* V ergibt sich dann mit:

$$V = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (21.7)$$

Beispiele normierter Sätze von Stokes-Parametern sind: $(1, 0, 0, 0)$: unpolarisiert; $(1, \pm 1, 0, 0)$: vollständig horizontal bzw. vertikal linear polarisiert; $(1, 0, \pm 1, 0)$: vollständig diagonal ($45^\circ/135^\circ$) linear polarisiert; $(1, 0, 0, \pm 1)$: vollständig rechts- bzw. linkszirkular polarisiert.

Zwischenbemerkung:

Identifiziert man die Parameter S_1 , S_2 und S_3 mit kartesischen Koordinaten, so kann 21.5 auch als Gleichung einer Kugel mit dem Radius S_0 gelesen werden, deren Mittelpunkt im Koordinatenursprung liegt. Jeder vollständig polarisierte Zustand ist dann charakterisierbar durch einen Punkt auf der Kugeloberfläche bzw. durch einen Ursprungsvektor $\mathbf{s} = (S_1, S_2, S_3)$. Die Gesamtheit der teilpolarisierten Zustände ist repräsentiert durch das Kugellinnere, der unpolarisierte Zustand fällt in den Kugelmittelpunkt. In dieser Darstellung der Polarisationszustände auf einem Zustands-Globus nach H. Poincaré [Poi92] wird die Beschreibung optischer Transformationen dadurch gelöst, dass man die Achse findet, um welche der Globus gedreht werden muss, damit der alte Zustand in den neuen übergeht. Das vereinfacht insbesondere die Beschreibung zusammengesetzter Transformationen im Falle mehrerer aufeinander folgender anisotroper Mittel [Jer54, RR61].

Als allgemeine Form des normierten Stokes-Vektors in Polarkoordinaten ergibt sich

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\phi \cos 2\theta \\ \cos 2\phi \sin 2\theta \\ \sin 2\theta \end{pmatrix}. \quad (21.8)$$

Der Azimutwinkel θ kennzeichnet die Lage der Polarisationsrichtung. Die Elliptizität des Zustandes wird durch ϕ festgelegt. Auf die physikalische Bedeutung von ϕ gehen wir im nächsten Abschnitt näher ein.

21.3 Zustandstransformationen

Für die Beschreibung optischer Transformationen mit Stokes-Parametern werden diese als Spaltenvektoren geschrieben. Die Transformation eines Zustands S durch ein optisches Mittel T in den Zustand S' ist nach Mueller durch die lineare Abbildung $T : [0, 1]^4 \rightarrow [0, 1]^4$ mit

$S' = T \cdot S$ definiert, wobei T die nach Mueller benannte 4x4-Matrix ist:

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (21.9)$$

Es gelten die allgemeinen Matrix-Rechenregeln. Jede optische Transformation und damit jedes optische Mittel, das in der Beziehung zu einem gegebenen Polarisationszustand als Zustandstransformator wirkt, lässt sich durch entsprechende Mueller-Matrizen beschreiben. *Homogene* und *inhomogene* Transformatoren unterscheiden sich dadurch, dass erstere in der Anwendung auf den orthogonalen Zustand das Dunkelbild $(0, 0, 0, 0)$ liefern, während letztere jeden beliebigen Ausgangszustand in denselben Endzustand transformieren.

Im Folgenden werden drei der wichtigsten Matrizen-Typen vorgestellt und einige Beispiele einfacher optischer Transformationen gegeben.

- Der ideale *Linearpolarisator*

$$T_L(2\alpha) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & 0 & 0 \\ \cos 2\alpha & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin 2\alpha \end{pmatrix} \quad (21.10)$$

- Der *Phasentransformator*

$$T(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (21.11)$$

ϕ bezeichnet die Phase bzw. Schichtdicke des transformierenden Mittels. Baut man den Transformator beispielsweise aus Schichten gleich orientierter doppelbrechender Folie auf (Frischhaltefolie, Cellophan o.ä.), so kann ϕ auch als Zykluszahl ε angesetzt werden mit

$$\varepsilon = \frac{2\pi n}{n_0} \quad (21.12)$$

Dabei ist n_0 die Anzahl der Folien, die man benötigt, um einen vollen Zustands-Zyklus zu durchlaufen. Geht man beispielsweise von einem horizontal linear polarisierten Zustand aus und transformiert diesen durch Erhöhen der Schichtenanzahl der doppelbrechenden Folie sukzessive in einen rechtszirkularen Zustand, so stellt das bis dahin benötigte Ensemble an Folien einen $\pi/4$ -*Transformator* dar. Verdoppelt man die Schichtenanzahl, so

erhält man einen $\pi/2$ -*Transformer*. Dieser erzeugt den zum Ausgangszustand orthogonalen, vertikal linear polarisierten Zustand. Dieser bezeichnet die Mitte des Zustandszyklus, d.h. eine weitere Verdopplung der Schichtenanzahl auf n_0 liefert wieder den Ausgangszustand. Es zeigt sich, dass die Winkelschrittweite der einzelnen Folie – bezogen auf den Zykluswinkel – eine Funktion der Farbe der untersuchten Ansicht bzw. Leuchte ist [GE01].

- Der *Rotator*

Die Darstellung der Matrizen (21.10) und (21.11) ist auf Koordinatenachsen x und y bzw. S_1 und S_2 bezogen. Die Beschreibung der Wirkungsweise beliebig gedrehter Transformatoren $T(\theta)$ erfordert eine Transformation der Koordinaten des Ausgangszustandes auf die Achsen von T : $S' = M_{Rot}(2\theta) \cdot S$ mit

$$M_{Rot}(2\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (21.13)$$

Auf S' wirkt der Transformator T und erzeugt den Zustand S'' : $S'' = T \cdot S' = T \cdot M_{Rot}(2\theta) \cdot S$. Die Rücktransformation der Zustandskoordinaten um $-\theta$ liefert den Endzustand S''' : $S''' = M_{Rot}(-2\theta) \cdot S''$:

$$\begin{aligned} S''' &= [M_{Rot}(-2\theta) \cdot T \cdot M_{Rot}(2\theta)] \cdot S \\ &= M(2\theta) \cdot S \end{aligned} \quad (21.14)$$

mit

$$M(2\theta) = M_{Rot}(-2\theta) \cdot T \cdot M_{Rot}(2\theta) \quad (21.15)$$

Mit diesen in Anlehnung an Collett [Col93], Brosseau [Bro98] und Hecht [Hec70] nur skizzenhaft gegebenen Mitteln der von Mueller entwickelten Methode kann die Erzeugung und Transformation der Gesamtheit von partiell und vollständig linear, elliptisch und zirkular polarisierten Zuständen für beliebige Stellungen der transformierenden Mittel beschrieben werden.

21.4 Beispiele

Zum Abschluss seien Beispiele einfacher optischer Zustandstransformationen gegeben:

1. Diagonaler Linearpolarisator T_{45} , angewendet auf unpolarisierten Zustand S_u :

$$T_{45} \cdot S_u = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21.16)$$

2. Zum ersten orthogonaler Linearpolarisator T_{135} , angewendet auf den in 1. erzeugten diagonal linear polarisierten Zustand S_{45} :

$$T_{135} \cdot S_{45} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21.17)$$

3. Rechts-Zirkularpolarisator T_R , bestehend aus Diagonal-Linearpolarisator T_{45} und $\pi/2$ -Phasenschieber $T_{\pi/2}$: $T_{\pi/2} \cdot T_{45} = T_R$.

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (21.18)$$

Test von T_R durch Anwendung auf einen unpolarisierten Zustand S_u :

$$T_R \cdot S_u = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (21.19)$$

4. T_R transformiert *jeden* Ausgangszustand in einen rechtszirkularen Zustand:

$$T_R \cdot S = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(S_0 + S_2) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (21.20)$$

5. Der *homogene* Rechts-Zirkularpolarisator erzeugt, angewendet auf einen linkszirkularen Zustand, das Dunkelbild:

$$T_R^{hom} \cdot S_L = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21.21)$$

21.5 Schluss

Anknüpfend an einige historische Bemerkungen habe wir skizziert, worin Kriterien einer Phänomenologie der Polarisation gesehen werden können. Hervorgehoben wurde dabei die Bedeutung einer Zustandsdefinition, die sich auf geordnete Beobachtungshandlungen stützt. Das Hauptanliegen war, zu zeigen, inwiefern sich für diesen Ansatz Stokes-Parameter und Mueller-Matrizen als geeignetes Instrument mathematischer Beschreibung ergeben. Dass die mathematische Beschreibung *selbst* einen anderen Charakter bekommt, wenn sie nicht der Hypothesenkonstruktion dient, sondern Strukturmerkmale einer Zustandsmannigfaltigkeit beschreibt, dürfte deutlich geworden sein.

Literaturverzeichnis

- [Bor96] BORTOFT, H.: *The Wholeness of Nature – Goethe’s Way of Science*. New York : Lindisfarne Press, 1996
- [Bro98] BROSSEAU, C. *Fundamentals of Polarized Light. A statistical optics approach*. 1998
- [Cha60] CHANDRASEKHAR, S.: *Radiative Transfer*. New York : Dover Publ., 1960
- [Col93] COLLETT, E. *Polarized light – fundamentals and applications*. 1993
- [Dus97] DUSTMANN, F. W. *Die optische Polarisation*. Unveröffentlichtes Manuskript. 1997
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES97] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: FISCHER, H.E. (Hrsg.): *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmlers Verlag, 1997
- [GE01] GREBE-ELLIS, J.: Doppeldrehung und Polarisation. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 75 (2001), Nr. 2, S. 13–32

- [GE02a] GREBE-ELLIS, J.: Zum Haidinger-Büschel. In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DGP 2002 in Leipzig.*, 2002
- [GE02b] GREBE-ELLIS, J.: Zur Phänomenologie der Polarisation. In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Beitrag zur Tagung der GDGP 2001 in Dortmund* Bd. 22. Berlin : Leuchtturm, 2002, S. 254–256
- [Goe81] v. GOETHE, J. W.: Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt. In: *Naturwissenschaftliche Schriften* Bd. 13. München : C.H. Beck, 1981, S. 10–20
- [Gre01] GREBE, J.: Vom Polarisations Schatten – Eine phänomenologische Betrachtung. In: *MNU* 54 (2001), Nr. 8, S. 452
- [Hec70] HECHT, E.: Note on an Operational Definition of the Stokes Parameters. In: *American Journal of Physics* 38 (1970), S. 1156
- [Huy96] HUYGENS, Ch.: Abhandlung über das Licht. In: LOMMEL, E. (Hrsg.): *Ostwalds Klassiker* Bd. 20. Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 1996
- [Jer54] JERRARD, H. G.: Transmission of light through birefringent and optically active media: the Poincaré-sphere. In: *Journal of the Optical Society of America* 44 (1954), S. 643–640
- [Mai81] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 35 (1981), Nr. 2, S. 26–42
- [Mai84] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 40 (1984), S. 42–52
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [MO98] v. MACKENSEN, M. ; OHLENDORF, H.-Ch.: *Modellfreie Optik*. Kassel : Pädagogische Forschungsstelle, 1998
- [Mue48] MUELLER, H.: The Foundations of Optics. In: *Journal of the Optical Society of America* 38 (1948), S. 661
- [Poi92] POINCARÉ, H.: *Théorie Mathématique de la Lumière*. Paris : Gauthiers-Villars, 1892
- [RR61] RAMACHANDRAN, G. N. ; RAMASESHAN, S.: Crystal Optics. In: FLÜGGE, S. (Hrsg.): *Handbuch der Physik*. Berlin : Springer, 1961

- [Sch93] SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992* Bd. 13. Alsbach : Leuchtturm, 1993, S. 271–273
- [Shu62] SHURCLIFF, W. A. *Polarized Light*. 1962
- [Sto01] STOKES, G. G.: On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources. In: *Mathematical and Physical Papers* 3 (1901), S. 233
- [Wei90a] v. WEIZSÄCKER, C. F.: Das Experiment. In: *Zum Weltbild der Physik*. Stuttgart : S. Hirzel, 1990
- [Wei90b] v. WEIZSÄCKER, C. F.: Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants. In: *Zum Weltbild der Physik*. Stuttgart : S. Hirzel, 1990
- [Wer00] WERNER, J.: *Vom Licht zum Atom: Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*. Berlin : Logos-Verlag, 2000. – Dissertation