

JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG  
PHYSIKALISCHES INSTITUT

# PHYSIKUNTERRICHT AN DER WALDORFSCHULE

-UNTERRICHTSGESTALTUNG ZUM THEMENBEREICH OPTIK-

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung  
für das Lehramt an Gymnasien 2009/10

eingereicht von  
MARGARETE ZIEMEK  
im September 2009

Gutachter:  
PROF. DR. T. TREFZGER





---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Die Freie Waldorfschule</b>	<b>2</b>
2.1	Historische Entwicklung . . . . .	2
2.2	Grundlagen der Waldorfpädagogik . . . . .	3
2.3	Der Lehrplan . . . . .	6
2.4	Die Institution Waldorfschule in Bayern . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Physikunterricht an der Freien Waldorfschule</b>	<b>10</b>
3.1	Allgemeines Verständnis von Naturphänomenen . . . . .	10
3.2	Struktur und Gestaltung des Unterrichts . . . . .	11
3.3	Goethes Farbenlehre . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Einblick in eine Physikepoche der Freien Waldorfschule Würzburg</b>	<b>15</b>
4.1	Hintergrundinformationen zur Schule und Klasse . . . . .	15
4.2	Vorwissen aus vergangenen Physikepochen . . . . .	17
4.3	Beobachteter Unterricht zum Themenbereich Optik . . . . .	18
4.3.1	Licht, Schatten und Kontrasteffekte . . . . .	18
4.3.2	Brechung und Farben . . . . .	20
4.3.3	Spiegel, Linsen und Linsenabbildung . . . . .	22
4.3.4	Vertiefung zur Interferenz und Wellenlängenberechnung . . . . .	23
4.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment und seine Folgen . . . . .	24
4.3.6	Strahlungsgesetz und Plancksches Wirkungsquantum . . . . .	27
4.3.7	Welle-Teilchen-Dualismus und Zusammenfassung . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Selbstgestaltete Unterrichtswoche</b>	<b>29</b>
5.1	Rechenaufgaben und Konstruktionen zur Linsenabbildung . . . . .	29
5.2	Einfachste Beugungserscheinungen . . . . .	34
5.3	Beobachtung der Beugung am Mehrfachspalt . . . . .	38
5.4	Das Huygenssche Prinzip . . . . .	42
5.5	Der Interferenzbegriff . . . . .	45
5.6	Gestaltung und Auswertung der Physikprobe . . . . .	48

<b>6</b>	<b>Fazit der Hospitation</b>	<b>50</b>
6.1	Persönliche Eindrücke und Auffälligkeiten . . . . .	50
6.2	Meinungsumfrage in der Klasse . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Möglichkeiten der Lichtgeschwindigkeitsmessung - ein Projekttag</b>	<b>53</b>
7.1	Grundlagen der Messmethoden und Durchführung . . . . .	53
7.1.1	Messverfahren nach Foucault . . . . .	53
7.1.2	Messung mittels Lissajous-Figuren . . . . .	57
7.1.3	Messung mit gepulstem Licht . . . . .	60
7.2	Zusammenfassung und Eindrücke . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Waldorfpädagogik am staatlichen Gymnasium</b>	
	<b>- kompatibel oder widersprüchlich?</b>	<b>62</b>
8.1	Optik in Bayerns G8-Lehrplan . . . . .	62
8.2	Gemeinsamkeiten und übertragbare Elemente . . . . .	64
8.3	Probleme und Grenzen der Übertragbarkeit . . . . .	65
<b>9</b>	<b>Waldorfschule und PISA - ein Ausblick</b>	<b>66</b>
9.1	Österreichische Waldorfschüler in PISA . . . . .	66
9.2	Das finnische Schulsystem . . . . .	69
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>71</b>
11.1	Wissensumfrage zur Optik . . . . .	71
11.2	Unterrichtsprotokolle . . . . .	72
11.3	Unterrichtsskizzen zur selbstgestalteten Woche . . . . .	99
11.4	Physikproben . . . . .	108
11.5	Fragebogen . . . . .	114
11.6	Einblick in einige Epochenhefte . . . . .	117
11.7	Einführende Präsentation zum Projekttag . . . . .	132
11.8	Versuchsanleitungen zur Lichtgeschwindigkeitsmessung . . . . .	141
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>149</b>

# 1 Motivation

Trotz zunehmender unterrichtsspezifischer Vorgaben und Kontrolle durch Lehrpläne, Bildungsstandards und häufig auch schulinterne Regeln, bleibt jedem Lehrer ein gewisser freier Spielraum in Hinsicht auf seine individuelle Unterrichtsgestaltung erhalten. Die Entwicklung der eigenen Ideen hierfür erfolgt aber meist vor dem Erfahrungshintergrund der eigenen Schulzeit an einer Staatsschule, einem Lehramtsstudium, welches konkret auf Bundesland und Schulform zugeschnitten ist, sowie einem absolvierten Referendariat an eben selbiger Schulform. Um Inspiration anderer Art muss sich dagegen jeder (zukünftige) Lehrer selbst bemühen (Fortbildungen, Auslandseinsatz, reformpädagogische Literatur, etc.). So kann er im Laufe seiner Ausbildung die Möglichkeit wahrnehmen, einmal einen Blick in den Unterricht einer Alternativschule zu werfen. Am bekanntesten sowie am häufigsten in Deutschland vorzufinden ist die Freie Waldorfschule und so bot es sich an, deren pädagogische Prinzipien und die daraus resultierende Unterrichtsgestaltung im Rahmen einer Hospitation zu studieren. Die vorliegende Arbeit fasst diese persönlichen Unterrichtserfahrungen zum Themenbereich Optik zusammen, beschreibt Unterrichtsbeobachtungen, die eigenständige Gestaltung einer Unterrichtswoche, aber auch Hintergründe zur Freien Waldorfschule. Sie richtet sich v.a. an Lehrer, Lehramtsstudierende, sowie Interessierte, speziell aus dem Fachbereich Physik, mit dem Ziel, andere Betrachtungsweisen aufzudecken, neue Ideen anzuregen und eventuell bestehende Vorurteile abzubauen.

## 2 Die Freie Waldorfschule

Um das Unterrichtsgeschehen an einer Waldorfschule verstehen und einordnen zu können, sollen zunächst grundlegende Gedanken und Ziele der Waldorfpädagogik aufgezeigt werden. In diesem Kapitel wird außerdem ein Überblick über die Entstehung und Entwicklung dieser Alternativschule geschaffen, bis hin zu ihrer heutigen rechtlichen Implementierung in Deutschland.

### 2.1 Historische Entwicklung

Die Waldorfschulbewegung entsprang der Reformpädagogik, entwickelte sich also nach dem ersten Weltkrieg, als der Drang nach bildungspolitischer Veränderung besonders groß war. Ihr Begründer war der Naturwissenschaftler und Philosoph Rudolf Steiner (siehe Abbildung 2.1), der bereits Jahre zuvor seine eigenen Gedanken zur „[...] bewussten Beziehung zum Geistigen im Menschen [...]“ [Bun07] formuliert hatte. Diese Gedanken und Ansichten sind seit 1902 in einer geisteswissenschaftlichen Lehre, der sog. Anthroposophie zusammengefasst. Mit diesen Ansätzen, insbesondere der Vorstellung einer dreigliederten Gesellschaft (siehe Abschnitt 2.2), fand Steiner im April 1919 Gehör bei den Mitarbeitern der Waldorf-Astoria-Zigarettenfabrik in Stuttgart, deren Unternehmenschef Emil Molt den Österreicher als Sozialphilosophen eingeführt hatte. Steiners Forderung war „[...] eine zwölfjährige Einheitsschule, die Volks- und höhere Schulen umfaßt und für jeden Menschen offensteht, unabhängig davon, welcher sozialen Schicht er angehört“ [Car81]. Die Kinder der Fabrikarbeiter konnten bereits ab September 1919 die erste Waldorfschule (Rudolf-Steiner-Schule) unter Leitung Rudolf Steiners besuchen. Noch vor Steiners Tod 1925 entstanden weitere Waldorfschulen in Deutschland, sowie erste Waldorfkindergärten. Bereits zehn Jahre nach der Erstgründung waren sie auch international zahlreich vorzufinden.

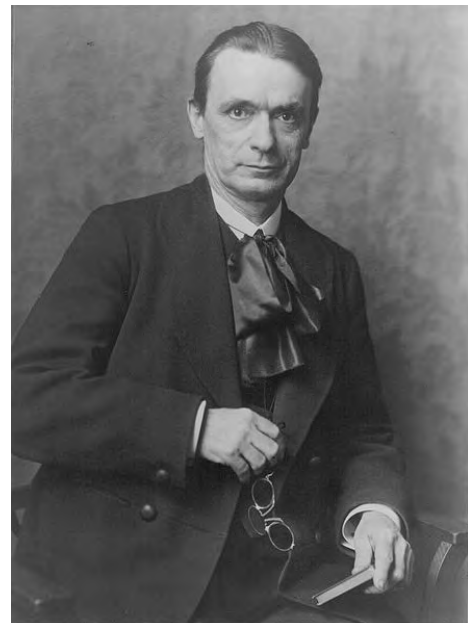


Abbildung 2.1: Rudolf Steiner  
(Quelle: [Ant09])

Zu Zeiten des Nationalsozialismus wurden einige Schulen zwangsweise geschlossen, andere stellten den Lehrbetrieb von sich aus ein. „Ideologische Konkurrenz konnte der Faschismus auf Dauer nicht dulden“ [Rud88], und so wurde ein Verbot der Neueinschulung an Waldorfschulen erlassen. Dieses machte eine Aufrechterhaltung und Finanzierung der Schulen problematisch. Doch schon 1945 wurde der Unterricht wieder aufgenommen und eine neue Welle der Waldorfbewegung führte zu zahlreichen Neugründungen im In- und Ausland. Heute gibt es 994 Waldorfschulen weltweit (Stand Juni 2009), davon 681 in Europa (vgl. [Bun09]). Hinzu kommen etwa 1500 Waldorfkindergärten, die häufig an die Schulen angegliedert sind.

## 2.2 Grundlagen der Waldorfpädagogik

Der Waldorfpädagogik liegen die Erkenntnisse der Anthroposophie zu Grunde. Obwohl diese weltanschauliche Elemente enthält, wehren sich Steiner, sowie die heutigen Vertreter der Waldorfpädagogik vehement gegen eine begriffliche Gleichsetzung mit „Weltanschauung“ oder „Weltbild“. Der gesamte Bereich dieser Geisteswissenschaft ist sehr komplex „[...] und der interessierte Nichtanthroposoph müßte ein Jahr lang jeden Tag ein Buch lesen, um der wesentlichen Systematik der Anthroposophie auf die Spur zu kommen“ [Rud88]. Es können und sollen im Folgenden daher nicht alle ihre Inhalte, sondern nur ansatzweise ihre wichtigsten Einflüsse auf die Waldorfpädagogik erläutert werden.

### Soziale Dreigliederung

Grundlegend für den Bedarf einer neuen Schulform bzw. eines neuen pädagogischen Ansatzes war für Steiner der viel zu große Einfluss des Staates auf das Bildungswesen. „Die Schule auf all ihren Stufen bildet den Menschen so aus, wie sie der Staat für die Leistungen braucht, die er für notwendig hält. In den Einrichtungen der Schulen spiegeln sich die Bedürfnisse des Staates“ [Ste69]. Aus dieser Kritik heraus entstand zur Zeit der Reformpädagogik die Dreigliederungsbewegung. Sie fordert die strikte Trennung der „[...] Sphären des geistig-kulturellen, des wirtschaftlichen und des rechtlich politischen Lebens [...]“ [Car81]. Das Kind soll seine individuellen Fähigkeiten frei entwickeln können. Diese *Erziehung zur Freiheit* kann jedoch nur durch einen Menschen erfolgen, der selbst unabhängig handelt und frei ist.

### Das Schulzeugnis

Freie Entwicklung widerspricht insbesondere der zielgerichteten Vorbereitung der Schüler<sup>1</sup> auf ihr späteres Berufsleben bzw. ihre Aufgaben im Staats- oder Wirtschaftswesen. Dem-

<sup>1</sup>Im folgenden seien damit stets Schüler und Schülerinnen bezeichnet, sofern eine Gegenüberstellung der Geschlechter nicht konkret aus dem Kontext hervorgeht

zufolge scheint auch jede Art von Leistungsdruck unnötig und damit verbunden auch die Vergabe von Noten, welche die Schüler viel zu sehr auf einen quantitativen Wert reduzieren. Stattdessen finden sich in den Zeugnissen der Waldorfschüler verbale Charakteristika wieder, die vom Klassenlehrer bzw. gemeinsam vom Lehrerkollegium erstellt werden. Besonders in den ersten Schuljahren werden die Schüler in diesem Schriftstück direkt angesprochen und ihre jeweiligen Fortschritte sowie Mängel zusammengefasst. Ein „Sitzenbleiben“ an der Waldorfschule gibt es nicht.

### **Dreigliedrigkeit des Menschen**

Die Idee einer Dreiteilung ist bei Steiner nicht nur in Bezug auf den sozialen Organismus zu finden. Auch der Mensch selbst ist nach anthroposophischer Auffassung dreigliedrig und umfasst das *Denken*, das *Fühlen* und das *Wollen*. Ziel der Waldorfpädagogik ist daher eine ganzheitliche Erziehung, d.h. sie will nicht die guten Fähigkeiten eines Schülers fördern, sondern stattdessen seine schlecht ausgeprägten Seiten ausgleichen. Die Elemente *Kopf*, *Herz* und *Hand* sollen in ihrer Entfaltung gleichberechtigt sein. Jeder Unterrichtsinhalt durchläuft daher diese Glieder, „[...] d.h. er führt stets von der Hand zum Herzen und vom Herzen zum Haupte, damit dieser von dem einzelnen Schüler in seiner ganzen Tiefe „be-griffen“, erfahren und auch nachempfunden werden kann“ [Ran99]. Demnach haben handwerkliche, aber v.a. auch künstlerische Fächer einen hohen Stellenwert an der Waldorfschule. Insbesondere die von Rudolf Steiner entwickelte Eurythmie ist schon früh Teil der Waldorferziehung und gilt als heilende Bewegungskunst.

### **Die vier Wesensglieder**

Ein weiterer zentraler Aspekt in der Anthroposophie ist die Annahme, dass sich der Mensch aus vier ineinander enthaltenen Wesensgliedern zusammensetzt, deren Entfaltung in Siebenjahresperioden nacheinander beginnt. Diese sind der physische Leib, der Ätherleib, der Astralleib und das Ich.

Im ersten Jahrsiebt entwickeln sich mit dem physischen Leib die inneren Organe und Sinne. Das Kind nimmt die Welt durch Nachahmung in sich auf, was durch Rhythmisierung der Handlungsabläufe begünstigt wird. Bereits im Waldorfkindergarten werden feste Wochentage und Tageszeiten für bestimmte Aktivitäten (Basteln, Malen, etc.) festgelegt. Dabei soll sich das Kind zur Anregung der Phantasie mit möglichst einfachen Dingen, wie z.B. Holz, beschäftigen, „[...] damit sich die Bildekräfte des Ätherleibes, aber auch das Empfindungs- und Gefühlsleben (Astralleib) des Kindes frei entfalten können“ [Ran99]. Der Erzieher soll dem Heranreifenden in dieser Phase für seine Entfaltung ein geeignetes Umfeld bereitstellen, jedoch selbst nicht zu sehr eingreifen. Denn „Belehrungen wirken nicht formbildend auf den physischen Leib, sondern auf den Ätherleib [...]“ [Ran99], so eine Aussage Steiners.



Im zweiten Jahrsiebt ist das Kind mit der Entwicklung des ätherischen Leibes bereit für Denk- und Lernaufgaben, womit Steiner auch das Einschulungsalter bei sieben Jahren begründet. Durch Orientierung an einer vorbildlichen und nachahmenswerten Autorität, deren Rolle vom Lehrer übernommen wird, soll das Kind in dieser Phase seine Werte ausbilden. Es lernt in seinen ersten Schuljahren daher vorrangig durch den Lehrervortrag und das Leherdiktat (vgl. [Ran99]). Die Bindung zur Autorität wird durch die Konstanz des Klassenlehrers über alle sieben Jahre hinweg verstärkt.

Mit Eintritt in die Pubertät beginnt im dritten Jahrsiebt die Entwicklung des Astralleibs und damit das Bewusstsein des seelischen Innenlebens. Gleichzeitig erfolgt die Trennung vom vertrauten, langjährigen Klassenlehrer. Er wird ersetzt durch Fachlehrer, da auf intellektueller Ebene nun die Sachlichkeit im Vordergrund steht. Gefördert werden sollen nun insbesondere abstraktes Denken und das eigene Urteilsvermögen. Insbesondere in den Hauptfächern werden ab diesem Zeitpunkt teilweise bepunktete Klassenarbeiten geschrieben.

Nach dem 21. Lebensjahr entwickelt sich das Ich weiter durch Umwandlung der anderen Wesensglieder.

### **Rhythmisierung**

Wie bereits angedeutet, ist die Rhythmisierung ein wichtiger Aspekt in der Waldorfpädagogik. Neben dem Siebenjahresrhythmus zur Entwicklung der Wesensglieder, ist die Rhythmisierung auch im einzelnen Schuljahr zu finden. So wird der Hauptunterricht in den ersten zwei Schulstunden des Tages in Epochen von drei bis vier Wochen pro Fach erteilt. Davon ausgenommen sind Fremdsprachen, künstlerische Fächer sowie Religionsunterricht, da diese regelmäßige Übung erfordern. Die Schüler beschäftigen sich während einer Epoche intensiv mit einem fachspezifischen Themenblock und bekommen anschließend Zeit, um ihre Erfahrungen zu verarbeiten. Der Schultag selbst ist ebenfalls rhythmisiert: nach dem intellektuell beanspruchenden Hauptunterricht werden die Schüler handwerklich gefordert, während die künstlerischen Fächer sowie Übungen mittags bzw. nachmittags besucht werden. Selbst eine Unterrichtsstunde ist gegliedert in Rhythmisierungsteil (z.B. Flöten, Singen, Tanzen), Wiederholungsteil, Hauptteil und Erzählteil.

### **Die Temperamente**

Rudolf Steiners Menschenkunde berücksichtigt des Weiteren die Lehre von den Temperamenten, deren Ursprung in der Antike liegt. Das Temperament eines Menschen kann als eine fest in ihm verankerte Neigung des Charakters betrachtet werden. Dabei werden die Gegensatzpaare cholerisch-phlegmatisch und sanguinisch-melancholisch unterschieden. Das Temperament ist zu erkennen an den im Folgenden erläuterten Temperamentsäußerungen (vgl. [Car81]).

**Der Choleriker** ist dynamisch und sucht die Gefahr

**Der Phlegmatiker** ist gelassen und nimmt alles meist mit Ruhe hin

**Der Melancholiker** ist empfindlich und egozentrisch

**Der Sanguiniker** ist lebensfroh und nimmt alles sehr leicht

Nach Steiner ist es „[...] eine der wichtigsten Aufgaben eines Lehrers, das Temperament seiner Schüler kennenzulernen [...]“ [Car81]. Dieses Wissen kann in der Unterrichtsführung genutzt werden. Schüler gleicher Temperamente sollten im Klassenzimmer z.B. gruppiert beisammensitzen, denn „[...] die Erfahrung lehrt, daß sie einander ihre Einseitigkeiten durch die ständige Konfrontation abschleifen [...]“ [Car81]. Mit dem Ziel einer größeren Selbsterkenntnis werden sie jeden Schultag dem Spiegelbild ihres eigenen Verhaltens ausgesetzt.

### 2.3 Der Lehrplan

Der Lehrplan der Waldorfschule ist seit 1919 beinahe unverändert geblieben. Seiner sog. normativ-deduktiven Begründung liegt wiederum die Anthroposophie zu Grunde. Auf dieser Einsicht aufbauend orientiert er sich an der kindlichen Entwicklung gemäß der vier Wesensglieder (siehe Abschnitt 2.2). Solch ein Kulturstufenlehrplan berücksichtigt dies, indem er „[...] bestimmte Epochen der Menschheitsgeschichte bzw. der Entwicklung des menschlichen Bewußtseins mit den verschiedenen Stufen des psycho-physischen Reifungsprozesses des einzelnen Schülers in Übereinstimmung zu bringen [...]“ [Ran99] versucht. Denn nicht die „[...] Ausbildung zum brauchbaren Staatsdiener [...]“ [Ste69] ist das Ziel, sondern die Herausbildung und Förderung der im Ursprung vorhandenen Fähigkeiten des Menschen. Nach dem Prinzip „Lernen mit Kopf, Herz und Hand“ richtet sich daher auch der Fächerkanon der Waldorfschule aus. Die schulüblichen Fächer wie Mathematik, Physik, Geschichte, Deutsch, zwei Fremdsprachen, Sach- und Erdkunde, Chemie, Biologie, Malen/Zeichnen, Religion, Turnen und Musik werden daher ergänzt um die Fächer Formenzeichnen, Plastizieren, Kunstgeschichte, Eurythmie, Werken, Handarbeit und Gartenbau. An vielen Schulen wird heute ab der neunten Klasse auch das Fach Computertechnologie unterrichtet. Neben Ausflügen und Klassenfahrten sind ab der achten Klasse auch größere Projekte angesetzt: ein dreiwöchiges landwirtschaftliches Praktikum in der neunten Klasse, ein zweiwöchiges Vermessungspraktikum in der zehnten Klasse, ein dreiwöchiges Sozialpraktikum in der elften Klasse, sowie selbstorganisierte und -gestaltete Klassenspiele in der achten und zwöften Jahrgangsstufe. Abbildung 2.2 zeigt den „organischen“ Lehrplan der anthroposophischen Entwicklungslehre.

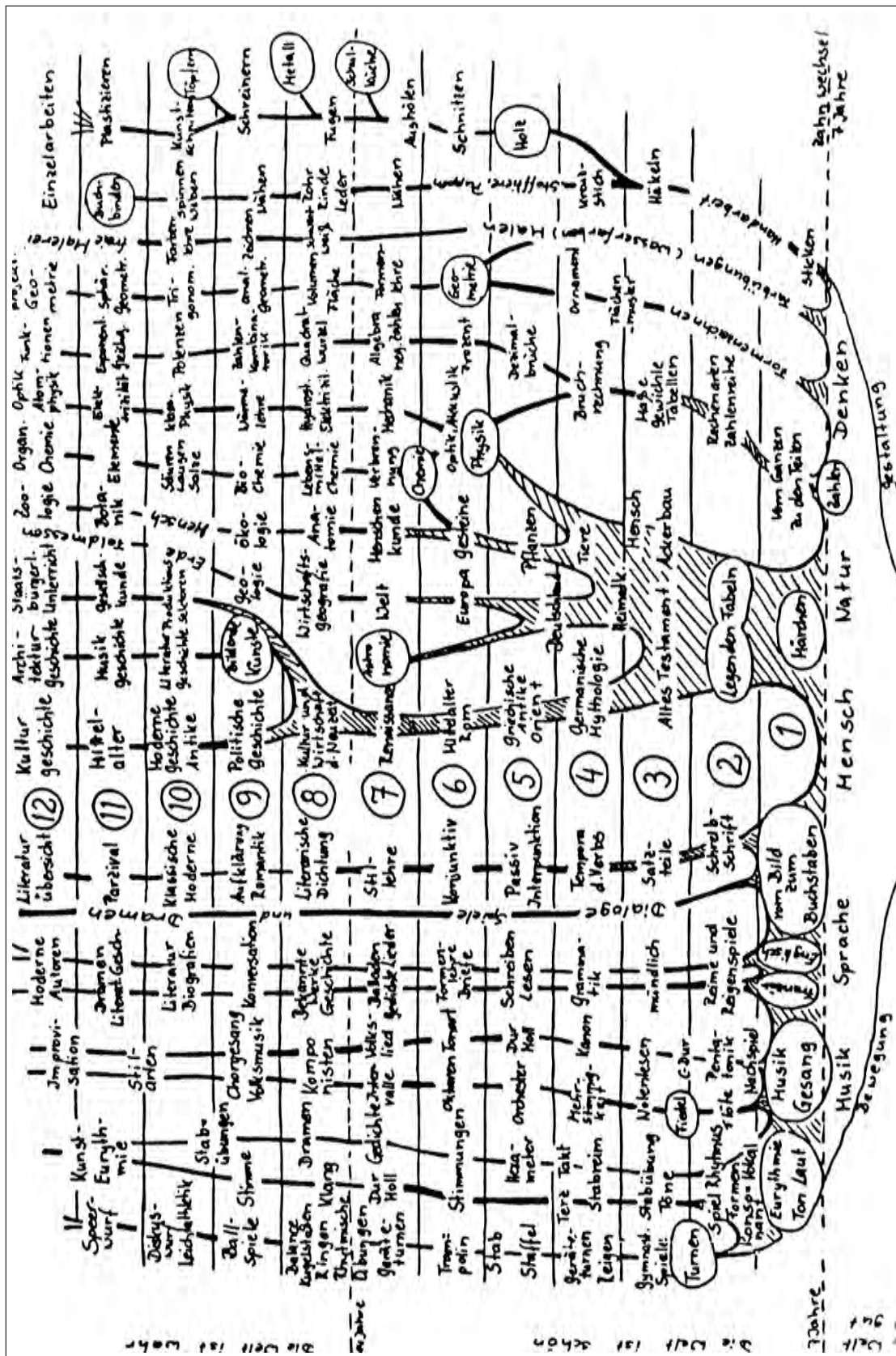


Abbildung 2.2: Der Lehrplan der Freien Waldorfschulen (Quelle: [Rud88])

## 2.4 Die Institution Waldorfschule in Bayern

Die Waldorfschule ist eine allgemeinbildende Gesamtschule, welche in Deutschland staatlich anerkannt ist und in privater Vereinsträgerschaft steht. Die Finanzierung und Initiierung erfolgt in erster Linie durch den „Bund der Freien Waldorfschulen e.V.“, deren Mitgliederkreis aus Eltern und Ehemaligen besteht, aber auch unabhängige Privatpersonen einschließt. Die pädagogische Verantwortung bzgl. der einzelnen Schule liegt allein beim Lehrerkollegium. Der Freistaat Bayern unterscheidet an dieser Stelle noch genauer zwischen staatlich anerkannten und genehmigten Privatschulen. Letzteres betrifft die Waldorfschule, denn weil der Waldorfschulabschluss, welcher nach der zwölften Klasse erlangt wird, deutschlandweit nicht staatlich anerkannt ist, müssen die nachfolgenden staatlichen Abschlussprüfungen hier schulextern absolviert werden. In den meisten Waldorfschulen wird daher der Besuch eines 13. Schuljahres angeboten, in welchem gezielt und intensiv auf die zentralen bayerischen Prüfungen der mittleren Reife oder des Abiturs hingearbeitet wird.

Das Kreisdiagramm in Abbildung 2.3 gibt die Verteilung der Abschlussarten aller 889 Absolventen der bayerischen Waldorfschulen im Jahre 2007 wieder. Während im Jahre 1975 lediglich 39 Waldorfschüler das Abitur erlangten, sind es hierbei nun schon 235. Diese und folgende statistische Werte zur Schule und Bildung in Bayern sind detailliert zu finden bei [Bay08].

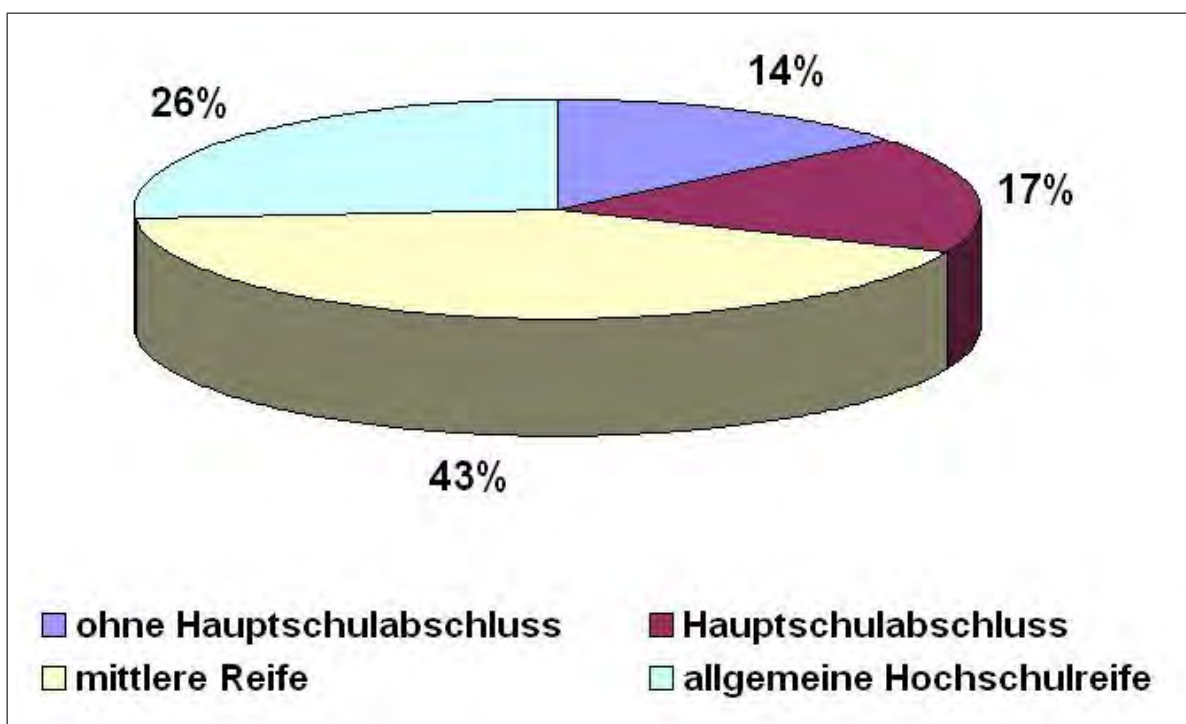


Abbildung 2.3: Verteilung der Abschlüsse 2007 an Bayerns Waldorfschulen

Besonders in den 80er und 90er Jahren stieg das Interesse an Freien Waldorfschulen und damit auch die Anzahl der Neugründungen stark an. Heute zählt die Bundesrepublik Deutschland insgesamt 213 Rudolf-Steiner-Schulen, davon 19 im Freistaat Bayern (Stand: Juni 2009). Die Tabelle in Abbildung 2.4 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Schul- und Schülerzahlen.

Jahr (jeweils 1. 10.)	Schulen	Schüler <sup>2</sup>			Klassen			Lehrer insgesamt <sup>3</sup>			Wöchentl. erteilte Unterrichts- stunden
		zusammen Jgst. 1 bis 13	davon Jgst.		zusammen Jgst. 1 bis 13	davon Jgst.		zusammen Jgst. 1 bis 13	davon Jgst.		
			1 bis 4	5 bis 13		1 bis 4	5 bis 13		1 bis 4	5 bis 13	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1970	2	1 601	604	997	46	16	30	96	18	78	•
1975	3	1 761	681	1 080	52	19	33	96	29	67	2 136
1980	4	2 297	839	1 458	69	24	45	127	40	87	2 904
1985	7	3 435	1 360	2 075	111	42	69	213	61	152	5 035
1990	12	4 649	1 922	2 727	217	78	139	337	110	227	7 420
1995	15	5 903	2 145	3 758	288	98	190	451	124	327	10 285
1996	15	6 040	2 139	3 901	292	99	193	446	115	331	10 214
1997	15	6 244	2 183	4 061	234	74	160	444	113	331	10 436
1998	15	6 404	2 186	4 218	236	73	163	455	113	342	10 759
1999	16	6 604	2 219	4 385	243	77	166	466	118	348	10 960
2000	18	6 689	2 293	4 396	250	83	167	478	123	355	11 293
2001	18	6 747	2 297	4 450	258	84	174	488	123	365	11 482
2002	18	7 026	2 350	4 676	261	86	175	484	124	360	11 602
2003	18	7 168	2 397	4 771	266	87	179	507	128	379	11 964
2004	18	7 263	2 401	4 862	268	88	180	495	122	373	11 979
2005	18	7 372	2 407	4 965	273	88	185	501	127	374	12 175
2006	18	7 417	2 460	4 957	280	94	186	508	131	377	12 336
2007	19	7 613	2 529	5 084	293	100	193	524	135	389	12 687

Abbildung 2.4: Entwicklung der Waldorfschulen in Bayern (Quelle: [Bay08])

Das allgemeine Ersatzschulwesen, welchem die Waldorfschule angehört, erhält durch den Freistaat Bayern entsprechend dem bayerischen Schulfinanzierungsgesetz (BaySchFG) eine finanzielle Zuwendung. In Höhe von 80% werden der notwendige Baukostenersatz sowie der Schulaufwand bis zur einschließlich vierten Klasse ersetzt. Hierunter fallen z.B. auch Aufwendungen für den kostenfreien Schulweg. Diese werden, zum Vergleich, an staatlichen Schulen bis immerhin zur einschließlich zehnten Klasse geleistet. „Für den notwendigen Personalaufwand erhält der private Schulträger für eigenes (nichtstaatliches Personal) eine teilpauschalierte Vergütung, soweit nicht staatliches Personal im notwendigen Umfang zugeordnet wird“ [Bay08]. Diese eingeschränkte finanzielle Unterstützung der Waldorfschule erfordert daher einen Ausgleich durch Schulgeld. Je nach Region liegen die monatlichen Elternbeiträge bei durchschnittlich 80 bis 200 Euro pro Kind und sind abhängig von Eltern-einkommen und Anzahl der Kinder gestaffelt (vgl. [Bun07]).

## 3 Physikunterricht an der Freien Waldorfschule

Der naturwissenschaftliche Unterricht, und damit insbesondere auch das Fach Physik, erhält mit seinen experimentellen Anteilen und Möglichkeiten der Selbsterfahrung einen besonderen Stellenwert an der Waldorfschule. Durch die Lehrplangebundenheit ist hier ein Spagat zwischen Vorstellungen des letzten Jahrhunderts und modernen, mathematisierten Modellen gefordert. Die daraus resultierende Unterrichtsführung wird in diesem Kapitel erläutert.

### 3.1 Allgemeines Verständnis von Naturphänomenen

Der Begriff des Phänomens kann vielen Bedeutungen zugewiesen werden. Einer dieser Interpretationen „[...] identifiziert das „Phänomen“ mit dem „Konkreten“ im Gegensatz etwa zum „Modell“, dem Abstrakten“ [Buc06]. Das Naturphänomen kann aber auch als Rätsel verstanden werden, als eine sonderbare Beobachtung, deren Erklärung nicht auf den ersten Blick zu finden ist. Dieses reine Beobachten steht im naturwissenschaftlichen Unterricht der Waldorfschule im Vordergrund. Besonders in den ersten Jahren soll das Abstrakte, das Modell, vermieden werden. „In erster Linie geht es um ein lebendiges Interesse an den Phänomenen der Naturwissenschaft, um ein Verständnis der Zusammenhänge. Das Mathematisieren kommt in zweiter Linie“ [Car81]. Während im Unterricht öffentlicher Schulen bereits in der Unterstufe die Begriffsstruktur zentral ist, wird an der Waldorfschule jede Art von Begriffsbildung und Vordefinition vermieden. „Steiner sah im Definieren gar den Tod jeden lebendigen Unterrichts [...]“ [Ran99]. Jeder Schüler sollte die Möglichkeit haben, eigene Bilder und Vorstellungen zu entwickeln, anstatt die Ursachen einer Beobachtung mit Hilfe abstrakter Begriffe zu klären. Durch Verzicht auf die begriffliche Reduzierung einer Erscheinung soll eine gewisse Faszination und damit verbundenes Interesse an der Natur erhalten bleiben. Dem zu Gute kommt die Vermittlung einer subjektiven Eingebundenheit des Schülers in die Natur: Nicht sie wirkt auf den Menschen, sondern der Mensch ist aktiver und interaktiver Beobachter und Vermittler zwischen dem was ist und dem was wahrgenommen wird. Ein Beispiel aus der Optik soll dies verdeutlichen: Zwar reflektiert bzw. emittiert jeder sichtbare Gegenstand von sich aus Licht, doch um ihn tatsächlich zu sehen, benötigt es den aktiven Blick des Menschen, der die Oberfläche des Gegenstandes danach abtastet. Abschließend seien an dieser Stelle als wichtige Vertreter der Modellfreiheit und Phänomenologie im Unterricht die Herren Manfred von Mackensen und Martin Wagenschein zu nennen, welche heute den Waldorfunterricht durch ihre zahlreiche Literatur prägen.

### 3.2 Struktur und Gestaltung des Unterrichts

Physik wird, wie jedes andere naturwissenschaftliche Fach, in Epochen von drei bis vier Wochen unterrichtet. Gemäß des Lehrplans (siehe Abschnitt 2.3) beginnt die physikalische Ausbildung in der 6. Klasse mit den Themenbereichen Optik, Akustik und Wärmelehre und endet in der 12. Klasse mit vertieften Einblicken in die Optik und deren Phänomene. Da Physik als Hauptunterricht erteilt wird, weist er entsprechend die Gliederung in rhythmischen Teil, Wiederholungsteil, Hauptteil und Erzählteil auf. Dem voraus geht zunächst aber Steiners Morgenspruch, der den neuen Schultag einleitet. Er wird in allen Waldorfschulen in der Klassengemeinschaft aufgesagt und lautet nach [Rud88] für die fünften bis zwölften Klassen wie folgt:

„Ich schaue in die Welt,  
In der die Sonne leuchtet,  
In der die Sterne funkeln;  
In der die Steine lagern,  
Die Pflanzen lebend wachsen,  
Die Tiere fühlend leben,  
In der der Mensch beseelt  
Dem Geiste Wohnung gibt;  
Ich schaue in die Seele,  
Die mir im Innern lebet.  
Der Gottesgeist, er webt  
Im Sonn'- und Seelenlicht,  
Im Weltenraum, da draußen,  
In Seelentiefen, drinnen.-  
Zu Dir, o Gottesgeist,  
Will ich bittend mich wenden,  
Dass Kraft und Segen mir  
Zum Lernen und zur Arbeit  
In meinem Innern wachse.“

Der Rhythmisierungsteil enthält im Physikunterricht, anstatt eines musikalischen Einstiegs, häufig kleine Knobel- und Denkaufgaben, welche gemeinsam in der Klasse gelöst werden. Anschließend werden die Beobachtungen der Schüler vom Vortag wiederholt, Ergebnisse der Experimente gedeutet und gemeinsam erklärt. Im Hauptteil werden, aufbauend auf bekanntem Wissen, neue erkenntnisbringende Experimente durchgeführt oder Phänomene aufgezeigt. Deren Klärung bleibt wiederum offen. Denn „[...] in einer gesund durchschlafenen Nacht kann eine Frage im Unterbewussten geistig aufkeimen, so dass sie am nächsten Tag mit

einem ganz anderen Tiefgang von den Schülern aus behandelt werden kann“ [Bun07]. Die starke Einbindung der Schüler in die praktische Durchführung der Experimente soll deren Interesse besonders fördern. Den Hauptunterricht abschließend folgt häufig ein Erzählteil, in welchem der Lehrer auf die geschichtliche Einordnung des Experiments und der Bedeutung seinerzeit eingeht.

Ab der zehnten Klasse etabliert sich die Mathematik mit ihrer Exaktheit zunehmend im Physikunterricht. Beginnend mit der klassischen Physik, bilden die erlangten mathematischen Erkenntnisse die Grundlage für das Verständnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten. Damit verbunden ist auch die zunehmende Integration bislang vermiedener Modelle in den Unterricht (vgl. Abschnitt 3.1). Wie in den meisten Fächern schreiben die Schüler während des Unterrichts in ihren Epochenheften größtenteils selbstständig mit. Der Tafelanschrieb durch den Lehrer wird mit zunehmendem Alter der Schüler immer seltener.

### 3.3 Goethes Farbenlehre

Da sich Rudolf Steiner neben philosophischen Erkenntnissen auch mit den naturwissenschaftlichen Schriften Goethes beschäftigte und diese zwischen 1883 und 1897 herausgab, ist nicht weiter verwunderlich, dass er diese, ihn beeindruckende Naturauffassung auch in den Lehrplan der Waldorfschule einfließen ließ. Besonders die 1810 veröffentlichte Schrift „Zur Farbenlehre“, von Johann Wolfgang von Goethe, beeinflusst noch heute den Inhalt des Optikunterrichts an der Waldorfschule.

Goethe beschäftigte sich mit alltäglichen (empirischen) Phänomenen. Dabei fragte er nicht „[...] nach einseitigen Kausalverweisen von Ursache und Wirkung der Phänomene, sondern nach ihren kontextbezogenen Erscheinungsbedingungen“ [Vog09]. Durch das Erkennen von Gesetzmäßigkeiten können sie wiederhergestellt werden und erlangen damit wissenschaftlichen Charakter. Grundlage der Farbenlehre Goethes ist das sog. *Urphänomen*, „[...] bei dem sich zwischen Licht und Finsternis die Farben im trüben Mittel entwickeln“ [Vog09]. Die Lehre beinhaltet nicht nur die physiologische, physische und chemische Erscheinung von Farben, sondern auch ihre Ästhetik. Da erstere zwei für den Physikunterricht jedoch am relevantesten sind, soll sich der folgende Einblick in die Farbenlehre auf diese beschränken. Am ausführlichsten beschrieb Goethe die physischen Farben, welche an denjenigen trüben, durchsichtigen oder undurchsichtigen Materialien entstehen können, die selbst keine Farbe besitzen. Je nach Art der Entstehung unterscheidet Goethe unter ihnen epoptische, katoptrische, dioptrische und paroptische Farben.

**Epoptik** bezeichnet die Farbentstehung an der Oberfläche eines unregelmäßigen oder verformten, farblosen Materials bei dessen Beleuchtung. Sie ist zum Beispiel als farbiges Schimmern bei Seifenblasen zu beobachten.

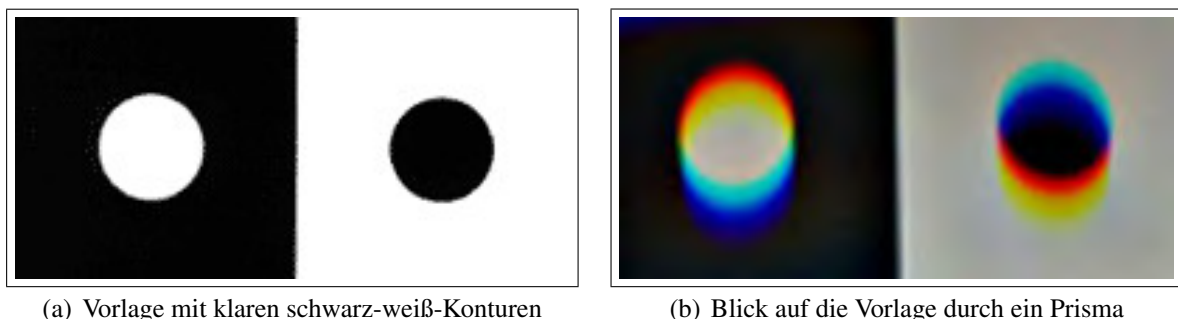


**Paroptik** bezeichnet die Farbentstehung durch Beugung des Lichts. Dringt Licht in den geometrischen Schattenraum eines Gegenstands, so treten an dessen Rändern Farben auf. Abbildung 3.1 zeigt eine Messerklinge, welche von einer Lichtquelle hinter der Bildebene beleuchtet wird. Zur Fotografie wurde der Schatten auf einen trüben Schirm aus Plexiglas geworfen.



Abbildung 3.1: Farbentstehung an den Kanten einer Messerklinge

**Dioptrik** bezeichnet die Farbentstehung beim Durchleuchten eines trüben oder durchsichtigen Materials. Ein Beispiel für dioptrische Farben ist nach Goethe das Himmelblau. Beim Blick auf etwas Helles (Sonne) durch etwas Trübes (Atmosphäre) entsteht die Farbe Blau. Blickt man jedoch durch ein durchsichtiges Material (z.B. Prisma) auf einen Grenzbereich von Hell und Dunkel, werden sog. Kantenspektren sichtbar (siehe Abbildung 3.2).



(a) Vorlage mit klaren schwarz-weiß-Konturen

(b) Blick auf die Vorlage durch ein Prisma

Abbildung 3.2: Kantenspektrum am Kreis (Quelle: [Vog09])

**Katoptrik** bezeichnet die Farbentstehung bei Reflexion von farblosem Licht an einer farblosen Fläche. Als Beispiel seien hierzu Reflexionen an der Oberfläche einer CD oder DVD zu nennen (siehe Abbildung 3.3).



Abbildung 3.3: Farbentstehung an einer DVD

Als physiologische Farben werden die Erscheinungen bezeichnet, welche durch „Fehler“ der menschlichen Wahrnehmung entstehen und heute oft mit dem Begriff der *optischen Täuschung* einhergehen. Zu unterscheiden sind hierbei die Effekte von zeitgleichem Simultankontrast und Sukzessivkontrast (Nachbildkontrast). Nachbilder entstehen im Auge nach längerem Anstarren eines Bildes und anschließendem Hintergrundwechsel. Sie entsprechen dabei dem „Negativ“ des Originals, bzw. weisen auf Grund der Anpassung des Auges die Komplementärfarben auf. Diese liegen sich in Goethes Farbkreis gegenüber (siehe Abbildung 3.4). Das Phänomen des farbigen Schattens ist ebenfalls ein Kontrasteffekt: Beleuchten zwei voneinander entfernte Lichtquellen, eine weiß und die andere farbig, einen Schattenwerfer, so sind an der Leinwand dahinter zwei Schatten zu erkennen. Derjenige Schatten, welcher durch die farbige Lichtquelle entsteht, erscheint in deren Komplementärfarbe. Diese Erscheinung war bereits vor Goethe bekannt. Eine detailliertere Beschreibung des Experiments, sowie Beispiele zum Simultan- und Sukzessivkontrast sind in Abschnitt 4.3.1 zu finden.



Abbildung 3.4: Goethes Farbkreis  
(Quelle: [Vog09])

## 4 Einblick in eine Physikepoche der Freien Waldorfschule Würzburg

Im Rahmen einer Hospitation an der Freien Waldorfschule in Würzburg konnte die bereits erläuterte, theoretische Unterrichtsgestaltung in ihrer Praxis beobachtet werden. Eine vierwöchige Physikepoche in der zwölften Klasse zum Themenbereich Optik ermöglichte nicht nur Beobachtungen aus Sicht der Schüler, sondern ließ auch die selbstständige Gestaltung einer abgerundeten Unterrichtswoche zu.

### 4.1 Hintergrundinformationen zur Schule und Klasse

Die Freie Waldorfschule Würzburg liegt, wie die meisten Schulen ihrer Art, weit abgelegen vom Kern der Großstadt. Am Rande des Stadtteils Frauenland bieten Grünflächen, ein Parkgelände sowie der weite Blick über die Residenzstadt ein besonders idyllisches Lernumfeld. 1975 gegründet, entließ diese Schule zehn Jahre später erfolgreich ihre ersten Absolventen. Seit 1999 schließt das Werkstätten und Sportanlagen umfassende Schulgelände auch einen Waldorfkindergarten und Hort mit ein (siehe Abbildung 4.1).



Abbildung 4.1: Übersicht Schulgelände (Quelle: [Wal08])

Knapp 60 Lehrkräfte bereiten hier ihre rund 450 Schüler auf die staatlichen Prüfungen der mittleren Reife oder des Abiturs vor. Intensive Prüfungsvorbereitungen werden durch ein zusätzliches 13. Schuljahr, nach Erreichen des Waldorfabschlusses, ermöglicht. An der Freien Waldorfschule Würzburg wird jede Jahrgangsstufe in einer Klasse zusammengefasst, sodass sich eine durchschnittliche Klassengröße von 35 Schülern ergibt, die sich in den Fachstunden und im praktischen Unterricht jedoch halbiert bzw. drittelt. Das Einzugsgebiet der Waldorfschule erstreckt sich vom 60 km entfernten Wonfurt nordöstlich von Würzburg, bis nach Marktbreit, 31 km südöstlich von Würzburg gelegen. Die Organisation und Finanzierung der Anreise zur Schule liegt ab der fünften Klasse allein in der Verantwortung der Schüler bzw. ihrer Eltern (vgl. Abschnitt 2.4).

An der besuchten Optikepoche nahmen 14 Schüler und 13 Schülerinnen teil. Diese zwölfte Klasse ist damit, wie eigentlich alle Klassen an der Waldorfschule, hinsichtlich der Geschlechterverteilung recht ausgeglichen. Von den 27 Schülern streben 9 den Abschluss der mittleren Reife und 18 das Abitur an. Sie wohnen zum Teil in Würzburg oder der näheren Umgebung, d.h. Margetshöchheim, Veitshöchheim und Randersacker, zum Teil aber auch in weiter entfernten Orten wie Lohr am Main. Der Hauptunterricht beginnt an dieser Schule um 7.50 Uhr und endet um 9.30 Uhr.



Abbildung 4.2: Blick auf den Oberstufenbau der Waldorfschule Würzburg

## 4.2 Vorwissen aus vergangenen Physikepochen

Gemäß des Lehrplans kamen die Schüler bereits in der sechsten Klasse erstmals in Berührung mit dem physikalischen Themenbereich Optik. Aber auch in den darauffolgenden zwei Jahren wurden im Physikunterricht verschiedene optische Phänomene behandelt:

Die Schüler machten praktische Erfahrungen mit Kontrasteffekten und anderen Anpassungserscheinungen des menschlichen Auges. Auch Schatten bzw. Halbschatten sowie der Spiegel und das Spiegelgesetz waren Inhalte der Physikepochen. Letztendlich lernten sie in der achten Klasse Erscheinungen an Wasseroberflächen, das Prisma und die Linsen kennen. Einige Wochen vor Beginn der Physikepoch wurde in der zwölften Klasse daher eine schriftliche Wissensumfrage zur Optik durchgeführt (siehe Anhang 11.1), an der jedoch nur zehn Schüler teilnahmen. Zu sieben Fragen sollten sie ohne Hilfsmittel aufschreiben, was ihnen aus vergangenen Epochen in Erinnerung geblieben war.

Bei der Frage nach Anpassungserscheinungen des Auges, war allen beteiligten Schülern die Anpassung an Helligkeit bzw. Dunkelheit durch Zusammenziehen bzw. Aufweiten der Pupille bekannt, ebenso die Schärfeeinstellung auf Nähe oder Ferne. Zwei Schüler erinnerten sich sogar an Nachbilder und das Auftreten von Komplementärfarben beim Wechsel des Hintergrunds. Der Begriff des Halbschattens war nur einer Schülerin bekannt, dagegen war allen Schülern die Abhängigkeit der Schattenlänge bzw. -form von der Lage der Lichtquelle zum Schattenspender klar. Zwei Schülerinnen verwiesen auf die Abhängigkeit der Schattendunkelheit von der Lichtintensität. Ein Schüler wiederum bemerkte, dass bei punktförmiger Lichtquelle der Schatten eines Gegenstands sein zentrisch gestrecktes Abbild ist. Zum Themenbereich Spiegel und ihre Bilder fiel bei einer Schülerin der Begriff der Reflektion, darüberhinaus wurden jedoch nur die gewöhnlichen Eigenschaften des Abbildes mit Vertauschung von links und rechts angesprochen. Obwohl die Räumlichkeit des Spiegelbildes in der sechsten Klasse angesprochen worden waren, erwähnte diese doch entscheidende Eigenschaft keiner der Schüler, ebensowenig die damit verbundene Gleichheit der jeweiligen Abstände von Gegenstand und Bild zur Spiegelfläche. Auf die Frage nach optischen Eigenschaften von Wasser lieferten beinahe alle Schüler folgende Antworten ab: Oberflächenspiegelung, Vergrößerung von Gegenständen wie bei einer Lupe, Erscheinen von Farben (bereits bei hoher Luftfeuchtigkeit). Zwei Schüler erinnerten sich sogar an eine gewisse Verschiebung des erblickten Gegenstands im Vergleich zu seiner tatsächlichen Lage. Hingegen schrieb ein Schüler von einem „Abknicken des Blickes“. Zwei Schüler konnten sich überhaupt nicht mehr an das Prisma und ihre Beobachtungen damit erinnern, wohingegen ihre Mitschüler Begriffe wie „Regenbogenfarben“ und „spektrale Aufspaltung“ verwendeten. Letztendlich konnten sich fünf Schüler an die Linsenformen konkav und konvex erinnern, obwohl die Unterscheidung beider Begriffe scheinbar Probleme bereitete. Dadurch wurden die Abbildungseigenschaften zum Teil falsch zugewiesen.

### 4.3 Beobachteter Unterricht zum Themenbereich Optik

Zur optimalen Vorbereitung auf die Selbstgestaltung des Unterrichts wurde die Physikepoche zunächst zwei Wochen lang passiv mitverfolgt. Inhaltlich konnte der Lehrer in diesem Zeitraum Schatten und Kontrasteffekte, Brechung und Farben sowie Linsen und ihre Abbildungseigenschaften im Unterricht behandeln. Doch auch in der vierten und letzten Woche der Physikepoche wurde die Hospitation fortgeführt, sodass der thematische Übergang von der Interferenz mit Wellenlängenberechnung über das Michelson-Morley-Experiment bis hin zum Photoeffekt beobachtet werden konnte. Zugehörige Protokolle sind im Anhang 11.2 zu finden. Mit einer dritten Probe wurde letztendlich für alle Schüler dieser zwölften Klasse der schulische Fachbereich Physik abgeschlossen. Die anschließende Beschreibung der Unterrichtsinhalte ist nicht streng chronologisch, da viele Themen durch häufige Wiederholung und Einsatz neuer Versuche unterbrochen oder erneut aufgegriffen wurden.

#### 4.3.1 Licht, Schatten und Kontrasteffekte

Zum Einstieg in den umfangreichen Themenbereich Optik hält der Physiklehrer zunächst einen Erzählteil ab, in welchem er auf die vielen historischen, religiösen, sprichwörtlichen und alltäglichen Bedeutungen des Lichts eingeht. Anschließend werden in der Klasse die bekannten Eigenschaften des Lichts wiederholt, wie z.B. seine geradlinige Ausbreitung. Durch einen Einstiegsversuch wird deutlich, dass Licht selbst, bzw. *Lichtstrahlen*, nicht sichtbar sind. Nur selbstleuchtende oder angestrahlte Gegenstände sind zu sehen. Um die erste Unterrichtsstunde der Epoche nicht zu intellektuell zu gestalten, zeichnen die Schüler anschließend den Schatten eines Stuhls für verschiedene Lichtintensitäten und Lichtquellenformen in ihre Hefte. Dabei lässt eine erhöhte Intensität den Schatten dunkler erscheinen. Beim letzten Einstiegsversuch wird eine schwarze Rolle an der Tafel mit einer Leuchtstoffröhre beleuchtet. Hinter der Rolle sind die Bereiche von Schatten und Halbschatten deutlich zu erkennen. Bei Einführung eines Lineals zwischen Lichtquelle und Schattenwerfer, bewegt sich offenbar ein heller Streifen im Schattenbereich entgegen der Linealbewegung. Alle diese Beobachtungen werden, wie im Physikunterricht üblich (vgl. Abschnitt 3.2), erst am Folgetag besprochen und geklärt. Schatten sind Kontrastobjekte, die sowohl bei tatsächlicher Abdunkelung des Raumes dunkler erscheinen, als auch bei Erhöhung der schattenerzeugenden Lichtintensität. Der Stuhlschatten wies am Vortag verschieden dunkle Stufen auf, sodass die Schüler aufgefordert werden, ihren vermuteten graphischen Verlauf der Lichtintensität zu zeichnen. Mittels Photodiode wird anschließend der wirkliche Intensitätsverlauf ermittelt. Entgegen der Vorstellung der Schüler, der Graph würde treppenförmig verlaufen, weist der wahre Verlauf keine Sprünge auf, sondern lediglich Steigungsänderungen auf. Diese Änderung der mathematischen Ableitung der Intensität kann dennoch vom menschlichen Auge wahrgenommen werden. Das Wissen um Kontrasteffekte wie dem Schatten, wird durch zusätzliche Versuche

erweitert. Auf einen weißen und einen schwarzen Bogen Papier wird jeweils ein farbiges Stück Papier geheftet. Bei den Papierstücken scheint es sich um dieselbe Farbe zu handeln. Positioniert man beide Papierstücke nebeneinander vor demselben Hintergrund, wird aber deutlich, dass die Farbtöne tatsächlich verschieden hell sind. Ein ähnlicher Kontrasteffekt ist bei den folgenden Figuren zu beobachten, die der Klasse ausgeteilt werden (siehe Abbildung 4.3). Da der Effekt sofort eintritt, wird er als *Simultankontrast* bezeichnet.

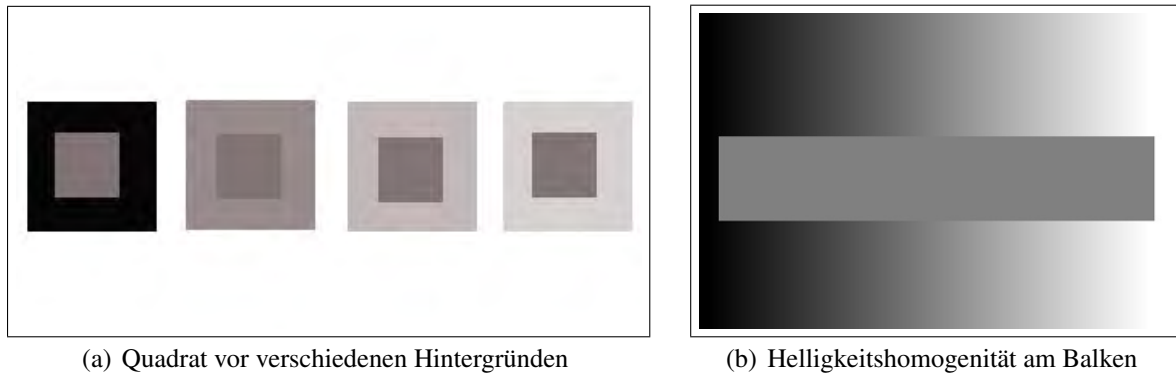


Abbildung 4.3: Simultankontrast an farblosen Figuren (Quelle: [Foc09])

Das rechteckige Farbpapier soll nun auf schwarzem Hintergrund angestarrt werden. Anschließend wird der Blick auf den leeren Bogen weißen Papiers gelenkt und es erscheint dort kurzzeitig ein Rechteck in der Komplementärfarbe. Dieser relativ spät einsetzende Effekt, der sog. *Sukzessivkontrast*, kann auch nach dem Anstarren des Jesusbildes in Abbildung 4.4 wahrgenommen werden. Bei anschließender Klärung des Effektes wird in einem Lehrervortrag auf die drei Farbrezeptoren im Auge und deren Funktion eingegangen.



Abbildung 4.4: Jesusbild zum Sukzessivkontrast (Quelle: [Pur09])

Als durchaus beeindruckendes Beispiel für den Simultankontrast wird die Entstehung des farbigen Schattens in einem weiteren Versuchsteil betrachtet. Gemäß Abbildung 4.5 tritt bei weißer und farbiger Lichtquelle hinter einem Schattenwerfer (SW) ein Schatten in der Komplementärfarbe auf. Blickt man durch ein langes Rohr auf den farbigen Schattenbereich, so stellt man fest, dass dieser in Wirklichkeit farblos ist. Das Experiment des farbigen Schattens wurde bereits von Goethe in seinen Beiträgen zur Optik erläutert (vgl. Abschnitt 3.3).

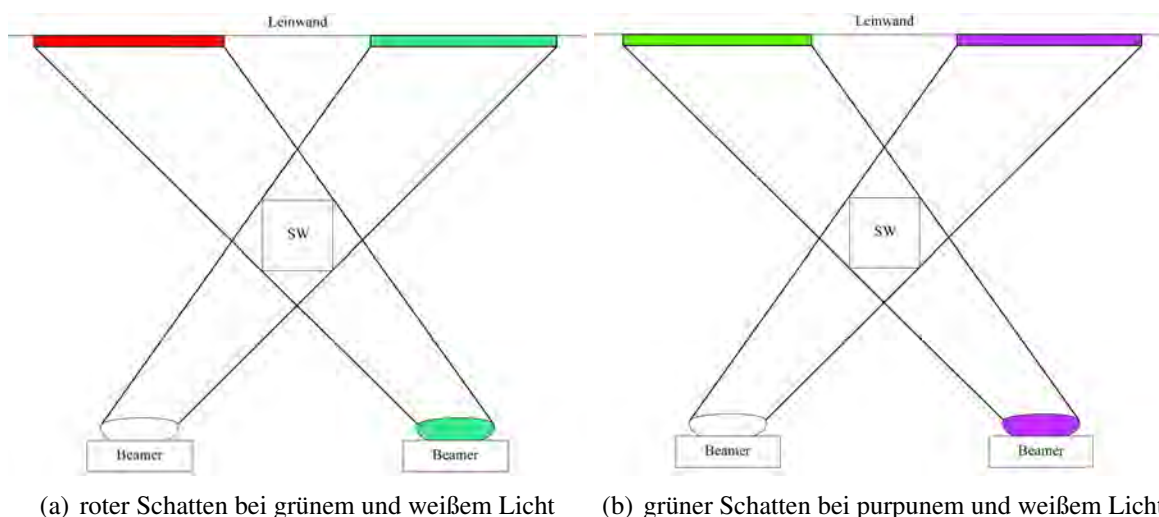


Abbildung 4.5: Entstehung des farbigen Schattens

### 4.3.2 Brechung und Farben

Der Einstieg zum Phänomen der Brechung erfolgt über Beobachtungen am Wasserbecken. Auf diese Weise kann der Begriff veranschaulicht werden, denn sobald ein hineingelegtes Lineal von oben betrachtet wird, ist dessen Abknicken in Richtung Wasseroberfläche zu beobachten - das Lineal scheint „abgebrochen“ zu sein. Trifft dagegen ein Lichtstrahl schräg auf die Wasseroberfläche, knickt dieser seitlich betrachtet nach unten. Die Schüler erinnern sich daran, dass auch im Schwimmbad die Fliesen nach oben verschoben scheinen. Dieses Phänomen wird sinngemäß als Hebung bezeichnet. Bleibt die Frage zu klären, wieso Lineal und Licht in verschiedene Richtungen abknicken. Blickt man entlang des einfallenden Lichtstrahls auf die Wasseroberfläche, so scheint dieser geradlinig zu verlaufen. Ein Schüler bemerkt an dieser Stelle, dass auch der eigene Blick ebenfalls an der Wasseroberfläche nach unten geknickt wird, der im Wasser befindliche Gegenstand deshalb näher bzw. höher erscheint. Vor einer dunklen Kreisscheibe, welche Markierungen des Abstands zur senkrechten Mittelachse aufweist, ist der Knick des Lichtstrahls für alle Schüler gut ersichtlich. Die Werte der Abstände vor und hinter dem Knickpunkt an der Wasseroberfläche werden tabellarisch zusammengefasst, wobei die Schüler durch Tafelanschrieb, Neujustierung des Strahls und



Ablesen der Werte in das Experiment involviert sind. Nach selbstständiger Auftragung eines zugehörigen Graphen ermitteln sie die Steigung der entstandenen Gerade. Der berechnete Wert von 1,33 ist charakteristisch für Wasser und wird allgemein als Brechungsindex  $n$  bezeichnet. Nach einer Wiederholung der bekannten trigonometrischen Funktionen wird der Steigungsquotient in Abhängigkeit von Eintrittswinkel  $\alpha$  und Brechungswinkel  $\beta$  ausgedrückt:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Zur Vorbereitung auf die Physikprobe werden in späteren Unterrichtsstunden einige Rechenübungen zum Brechungsgesetz durchgeführt, wobei u.a. die Brechungsindizes für Glas und Diamant vermerkt werden.

Die Brechung des Lichts wird bei verschiedenen Objekten genutzt, z.B. beim Prisma. Als solches wird zunächst ein keilförmiger, durchsichtiger und mit Wasser gefüllter Behälter benutzt. Beim Blick durch diesen fällt den Schülern eine Verschiebung des dahinter liegenden Bildes in Richtung der ziehenden Kante auf. Anschließend werden handliche Glasprismen in der Klasse verteilt. Beim Blick durch das Prisma auf ein Schachbrettmuster aus Papier, stellen die Schüler Farbverläufe an den Grenzlinien im Muster fest. Über dieses Kantenspektrum werden weitere Alltagsphänomene angesprochen, wie z.B. das Himmelblau und das Abendrot. In einem Erzählteil verweist der Lehrer die Klasse darauf, dass diese angesprochenen Erscheinungen Goethes Urphänomene entsprechen (vgl. Abschnitt 3.3). Blau entsteht demnach beim Blick auf etwas Helles durch etwas Trübes, während die Farbe Rot bei dunklem Hintergrund zu sehen ist. Diese Urphänomene werden schriftlich zusammengefasst und die Beobachtungen am Prisma in die Hefte gezeichnet. Der Versuch wird erweitert, indem statt einem Schachbrettmuster ein schwarzer Keil auf weißem Hintergrund sowie ein weißer Keil auf schwarzem Hintergrund durch das Prisma betrachtet wird. Die entstehenden blau-violetten und rot-gelben Farblinien laufen an der Keilspitze zusammen. Im schwarzen Keil entsteht die Mischfarbe Magenta, im weißen Keil dagegen Grün. Mit dem Diaprojektor können weitere schwarz-weiß-Muster für alle Schüler sichtbar an die Leinwand geworfen und ihr Kantenspektrum betrachtet werden.

Während Goethe durch reine Beschreibung seiner Beobachtungen Naturwissenschaft betreibt, gründet Isaac Newton eine modellbehafte Theorie. Er geht davon aus, dass weißes Licht alle Farben enthält. Die Lichtstrahlen sind verschieden schwere Teilchen, auf die in alle Richtungen Kräfte wirken. Im homogenen Medium befinden sich alle Farbteilchen im Gleichgewicht, während dieses an Grenzflächen zu einem anderen Medium gestört ist. Die Lichtteilchen werden unterschiedlich stark in das optisch dichtere Medium hineingezogen. Solch ein „starkes Medium“ ist z.B. Glas, während Luft als relativ „schwaches Medium“ einzustufen ist. Mit Hilfe seiner Erkenntnisse zur Mechanik versucht Newton die Brechung durch vergleichsweise größere Beschleunigung leichterer Lichtteilchen bei gleicher, vom

Medium ausgehender Kraft zu erklären. Eine Skizze mit eingezeichneten Beschleunigungspfeilen an der Grenzfläche zweier Medien verdeutlicht seine Vorstellung. Eine weitere Skizze zeigt die farbliche Aufspaltung eines Lichtstrahls an einem Prisma. Noch bevor Kritik an diesem Modell geübt wird, scheinen die Schüler skeptisch zu sein und fragen bereits nach dessen Wahrheitsgehalt.

### 4.3.3 Spiegel, Linsen und Linsenabbildung

Die Brechung wird nicht nur beim Prisma zur Aufspaltung des weißen Lichts genutzt (vgl. Abschnitt 4.3.2), sondern auch bei Linsen. Je nach Form können Lichtstrahlen dabei auf einen Punkt (Brennpunkt) gebündelt oder gestreut werden. Zur Wiederholung dieser Eigenschaften von Konvex- bzw. Konkavlinen wird im abgedunkelten Raum der Lichtbündelverlauf vor und hinter der vertikal angebrachten Linse beobachtet. Je nach Blendeneinsatz vor der Lichtquelle, ist entweder ein einzelner Lichtbündelstrahl zu sehen, oder mehrere parallele Strahlen. Auf diese Weise lässt sich auch der Brennpunkt der Sammellinse ermitteln. Im folgenden Unterrichtsverlauf steht die Konvexlinse (Sammellinse) im Vordergrund. Mit welchen Eigenschaften sie einen Gegenstand abbildet, soll mit Hilfe des Versuchsaufbaus aus Abbildung 4.6 ermittelt werden. Eine Blende vor der Lichtquelle liefert ein Dreieck als abzubildenden Gegenstand. Bei zuvor festgelegtem Linsenabstand  $g$  wird von einzelnen Schülern derjenige Abstand  $b$  des Abbildungsschirms zur Linse bestimmt, bei welchem das dargestellte Bild  $B$  am schärfsten zu sehen ist. Die Werte für die Bildweite  $b$  und die Bildgröße  $B$  zu mehreren Gegenstandsweiten  $g$  werden tabellarisch zusammengefasst.

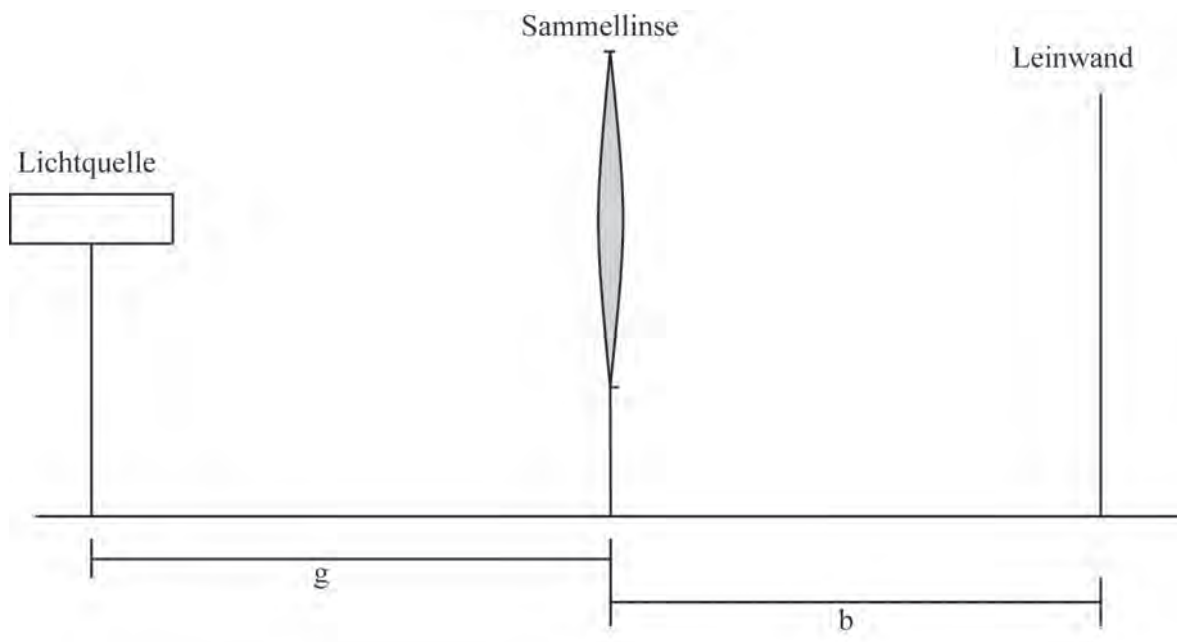


Abbildung 4.6: Aufbau zur Bestimmung der Abbildungseigenschaften einer Sammellinse

Eine Konstruktionsskizze zur Sammellinse ermöglicht durch Anwendung des Strahlensatzes eine mathematische Formulierung des Abbildungsverhältnisses und im Folgenden die Herleitung der Linsengleichung:

$$\boxed{\frac{g}{b} = \frac{G}{B}} \quad \text{Abbildungsverhältnis}$$

$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}} \quad \text{Linsengleichung}$$

Mittels Linsengleichung berechnen die Schüler die Brennweite der zuvor verwendeten Sammellinse. Anschließend sollen sie herausfinden, für welche Gegenstandsweite  $g$  das Bild  $B$  ebenso groß ist wie der Gegenstand  $G$ . Durch mehrere Umformungen erhält man folgende Bedingung:

$$g = 2 \cdot f$$

Bevor der Physiklehrer die Unterrichtsführung für eine Woche weitergibt (siehe Kapitel 5), werden in der Klasse die Eigenschaften eines planaren Spiegels wiederholt. Wesentlich ist die Räumlichkeit des Spiegelbildes. Eine gespiegelte Kerze sendet im Aufbau vor einem Spiegel ebenso Licht aus wie die originale Kerze. Am Boden eines Schattenwerfers finden sich daher zwei Ansätze von Schatten.

#### 4.3.4 Vertiefung zur Interferenz und Wellenlängenberechnung

Nach Einschub der selbstgestalteten Unterrichtswoche (siehe Kapitel 5) beginnt der Lehrer seinen Wiedereinstieg in das Unterrichtsgeschehen mit einer allgemeinen Wiederholung der bisher bekannten Vorstellungen zum Licht. Einige Schüler fassen kurz die grundlegenden Ideen von Goethe, Newton und Huygens zusammen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass Goethe im Gegensatz zu den anderen beiden Wissenschaftler auf jede Art von Modell verzichtet und stattdessen reine Beobachtungen schildert. In einem Lehrer-Schüler-Gespräch werden Vor- und Nachteile aller Theorien abgewägt. Newtons Teilchentheorie ist letztendlich nicht mit den Interferenzerscheinungen am Transmissionsgitter zu vereinbaren. Daran anknüpfend wird das Prinzip der Lichtinterferenz wiederholt, sowie das Auftreten der weiteren farbigen Streifen an der Leinwand nochmals geklärt. Der Physiklehrer erwähnt, dass der Versuch mit zwei Lichtquellen nicht dieses Ergebnis liefern würde und führt in diesem Zusammenhang den Begriff der geforderten Kohärenz ein. Gemeinsam werden verschiedene Formen von Wellen wiederholt, woraus sich die Forderung nach dem bereits erwähnten Äther ergibt. In einem Erzählteil hören die Schüler aufmerksam zu, welche Vorstellungen man zu diesem Medium hatte bzw. welche Eigenschaften es physikalisch betrachtet aufweisen müsste. Diesen zufolge kann solch ein Medium nicht existieren. Nach einer Wiederholung

der Elektrizitätslehre aus der 11. Klasse, insbesondere dem Prinzip eines Schwingkreises aus Kondensator und Spule, verweist der Lehrer auf die vier Maxwell-Gleichungen. Sie beschreiben die gegenseitige Hervorrufung von elektrischen und magnetischen Feldern und erklären damit die Selbstausbreitung sog. elektromagnetischer Wellen im Raum. Diese erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit. Ihr Spektrum wird an die Tafel skizziert.

Anschließend wird der Versuch 8 aus vergangener Woche (siehe Abschnitt 5.5) aufgegriffen. Nach Vervollständigung der Tabelle zu den Wellenlängen einer Quecksilberdampfampe, geht der Lehrer kurz auf die Ausnutzung optischer Aufheller ein. Die diskreten Farblinien verweisen auf die chemischen Eigenschaften des Leuchtstoffes. An dieser Stelle werden einige Nachweismethoden der Physik und Chemie erwähnt, welche eben solche Interferenzmuster ausnutzen. Sind die Wellenlängen jedoch bekannt, kann auch umgekehrt die Gitterkonstante eines Mehrfachspaltes berechnet werden. Als Beispiel führen die Schüler selbst einen Versuch durch, bei dem sie die Spurbreite einer CD bestimmen sollen. Dabei wird diese als Reflexionsgitter verwendet und weist auf Grund der Spiegeleigenschaften ein ähnliches Bild auf, wie die bisher kennengelernten Transmissionsgitter. Die Schüler stellen sich mit dem Rücken zu einer Deckenlampe und betrachten die Farbentstehung durch Reflexion in der CD vor ihrem Gesicht (vgl. Abbildung 3.3, Abschnitt 3.3). Anschließend wird als Lichtquelle eine Leuchtstoffröhre verwendet, wobei die Farblinien nun deutlicher voneinander getrennt sind. Über ein ausgeteiltes Handspektroskop ermitteln sie die der grünen Farbe zugehörige Wellenlänge und notieren diese. Durch partnerweises Ausmessen der Abstände zwischen Auge und CD, sowie zwischen weißem Licht und grünem Streifen, erhalten die Schüler die nötigen Daten zur Berechnung der Spurbreite. Mit  $1,4\mu\text{m}$  liegt das Ergebnis nahe beim wahren Wert ( $a = 1,6\mu\text{m}$ ). Da bei der Berechnung noch Schwierigkeiten auftreten, wiederholt der Lehrer in der Klasse nochmal den mathematischen Hintergrund. In weiteren Unterrichtsstunden folgen einige Übungen zur Wellenlängenberechnung. Unter anderem wird auf die Funktionsweise eines Lasers eingegangen und auch dessen emittierte Wellenlänge berechnet.

#### 4.3.5 Das Michelson-Morley-Experiment und seine Folgen

Anknüpfend an der Kritik der Existenz eines Äthers (vgl. Abschnitt 4.3.4) stellt der Lehrer einen historischen Versuch vor, der eben diese widerlegt. Denn falls der Äther überall im Weltraum vorhanden ist, kann nicht angenommen werden, dass er sich gemeinsam mit der Erde dreht. Durch deren Drehung müsste also ein sog. *Ätherwind* auf der Erde entstehen und die Lichtausbreitung beeinflussen. Beispielhaft wird auf den Dopplereffekt<sup>2</sup> bei vorbeifahrendem Auto oder Krankenwagen mit Sirene verwiesen. Dass dieser Effekt bei ruhender Lichtquelle nicht auftritt und ein Äther daher nicht existieren kann, zeigt das Experiment von Edward Morley und Albert Abraham Michelson aus dem Jahre 1887.

---

<sup>2</sup>Der Begriff wurde im Unterricht so nicht verwendet

Das Grundprinzip des Michelson-Morley-Interferometers wird an die Tafel skizziert und erläutert (siehe Abbildung 4.7). Auf Grund des Ätherwindes müsste sich das resultierende Interferenzmuster bei neuer Ausrichtung der Aparatur verändern. Dies ist aber nicht der Fall, womit die Existenz des Äthers widerlegt ist. Daraus folgt wiederum, dass es keinen absolut ruhenden Punkt gibt, die Lichtgeschwindigkeit also eine feste Naturkonstante ist, die nicht vom Beobachter und seinem Bewegungszustand abhängt.

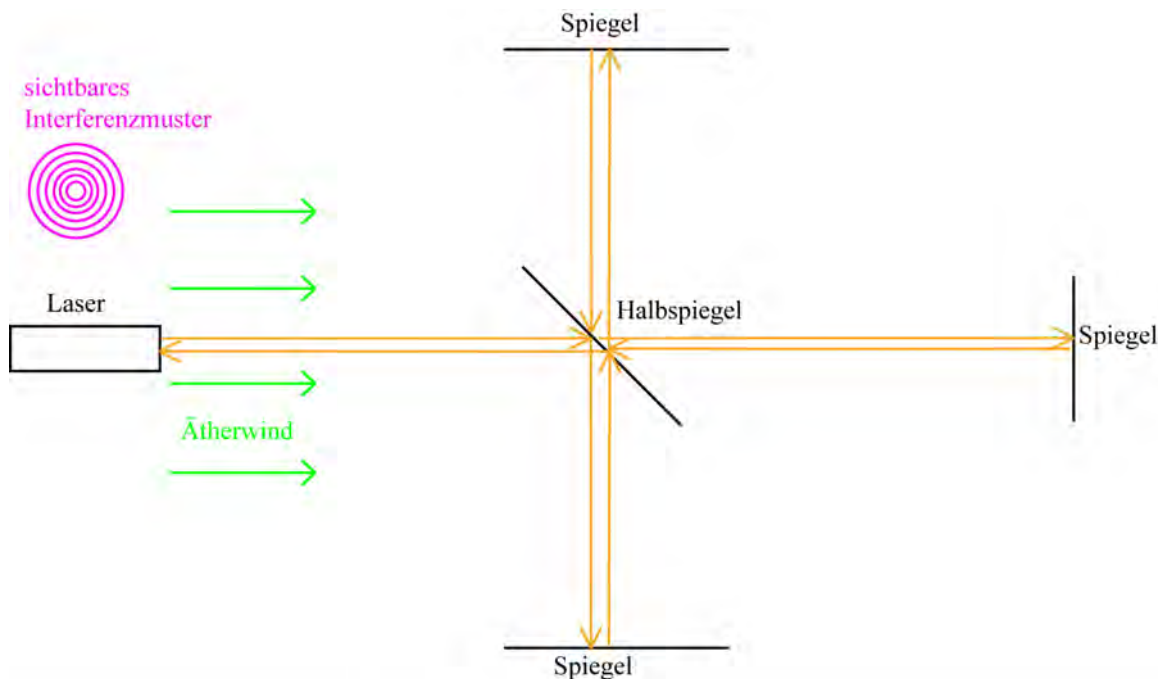


Abbildung 4.7: Prinzip des Michelson-Morley-Interferometers

Dies widerspricht bisherigen Alltagsbeobachtungen. Wirft man z.B. einen Ball im fahrenden Zug senkrecht nach oben, so scheint er sich aus Sicht des Werfers nicht horizontal zu bewegen. Ein Beobachter am ruhenden Bahnsteig dagegen, sieht, wie sich der Ball nach vorne bewegt, und zwar mit der Geschwindigkeit des Zuges. Ein Lichtstrahl jedoch, ist im fahrenden Zug ebenso schnell wie von außen betrachtet. Hier wird auf Einstein und seine spezielle Relativitätstheorie von 1905 verwiesen. Welche Aussagen sie über die Zeit macht, wird durch folgendes Gedankenexperiment eingeführt: Eine Lichtuhr besteht aus zwei parallelen Spiegeln, die einen Lichtblitz ständig hin und zurück reflektieren. Das Auftreffen des Blitzes an einem der Spiegel zählt die Zeiteinheiten. Ein Betrachter, der sich zusammen mit der Lichtuhr mit Geschwindigkeit  $v$  bewegt, registriert eine ruhende Lichtuhr (siehe Abbildung 4.8(a)). Ein ruhender Außenbetrachter hingegen nimmt den Lichtblitzverlauf gemäß Abbildung 4.8(b) wahr.

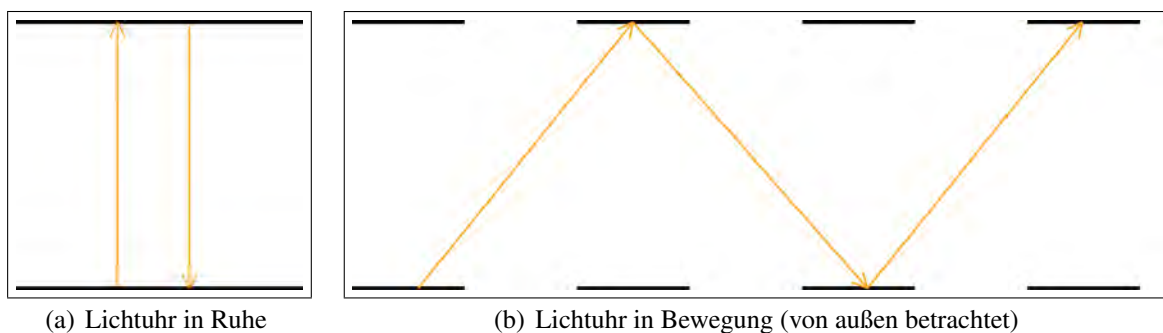


Abbildung 4.8: Zeitmessung durch eine Lichtuhr

Da sich der Lichtblitz in beiden Bezugssystemen mit fester Lichtgeschwindigkeit  $c$  bewegt, ergibt sich folgendes Vektordreieck:

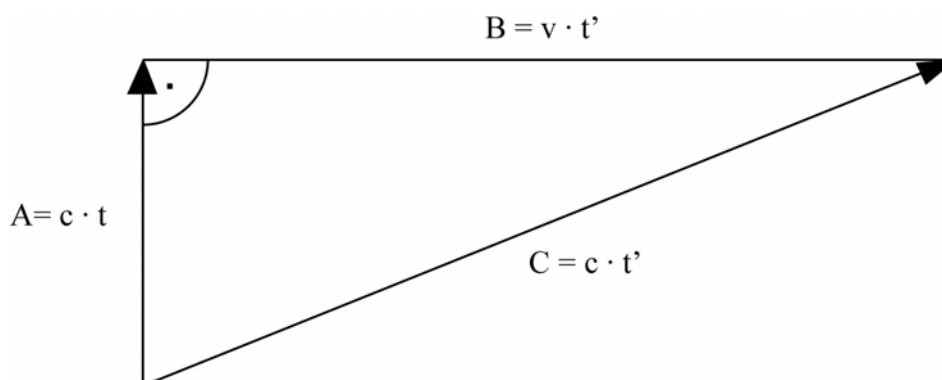


Abbildung 4.9: Vektordreieck zur Relativitätstheorie

Dabei sind  $t$  und  $t'$  verschiedene Zeitspannen und offensichtlich gilt  $t' > t$ . Nutzt man an dieser Stelle den Satz des Pythagoras, erhält man aus  $A^2 + B^2 = C^2$  folgende Abhängigkeit der Zeiten:

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot t$$

Die Zeit im bewegten Bezugssystem vergrößert sich also. Die Schüler fertigen selbstständig eine Tabelle zur *Zeitdilatation* für verschiedene Geschwindigkeiten  $v$  an. Mit Hilfe der Relativitätstheorie lassen sich physikalische Effekte, wie das Auftreffen von Myonen auf der Erde erklären. Die Lebensdauer dieser Elementarteilchen ist so kurz, dass sie die Erde nicht erreichen dürften. In ihrem sehr schnell bewegten Bezugssystem verläuft die Zeit jedoch langsamer, sie ist gedehnt und ermöglicht das Überleben eines Zeitraumes, der die Lebensdauer im Ruhesystem übersteigt.

### 4.3.6 Strahlungsgesetz und Plancksches Wirkungsquantum

Bei der Messung der Spurweite einer CD (vgl. Abschnitt 4.3.4) haben die Schüler beim Blick durch das Handspektroskop bereits festgestellt, dass die Glühbirne in der Deckenlampe im Gegenteil zur Leuchtstoffröhre ein kontinuierliches Spektrum aufweist. Wie sich dabei die Intensität auf die verschiedenen Farben verteilt, zeigt die Kurve des Planckschen Strahlungsgesetzes (siehe Abbildung 4.10). Eine Tafelskizze enthält das Sonnenspektrum, eingezeichnet mit etwa 6000 Kelvin, sowie den Intensitätsverlauf einer Glühbirne mit etwa 3200 Kelvin. Im anschließenden Erzählteil beschreibt der Lehrer die Annahme des späteren Nobelpreisträgers Max Planck, dass Licht von Oszillatoren ausgeht und diese nicht mit beliebiger Amplitude schwingen können. Die Schwingung kann nur in bestimmten Stufen erfolgen. Damit kann die Energie eines Strahlers ebenfalls nur in Paketen abgegeben werden und es gilt

$$E = h \cdot \nu$$

Hierbei ist  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $\nu$  die Frequenz des abgestrahlten Lichts. Bei geringerer Temperatur nimmt die Energie  $E$  ab und damit auch die Frequenz  $\nu$ . Daher ist bei kälteren Strahlern der ultraviolette bzw. blaue Anteil vergleichsweise gering. Stattdessen werden mehr rote und orange Oszillatoren angeregt, womit auch die Rotglut nach erloschenem Feuer erklärt werden kann. Durch einen kurzen Tafelanschrieb werden diese Erkenntnisse aus dem Jahre 1900 zusammengefasst.

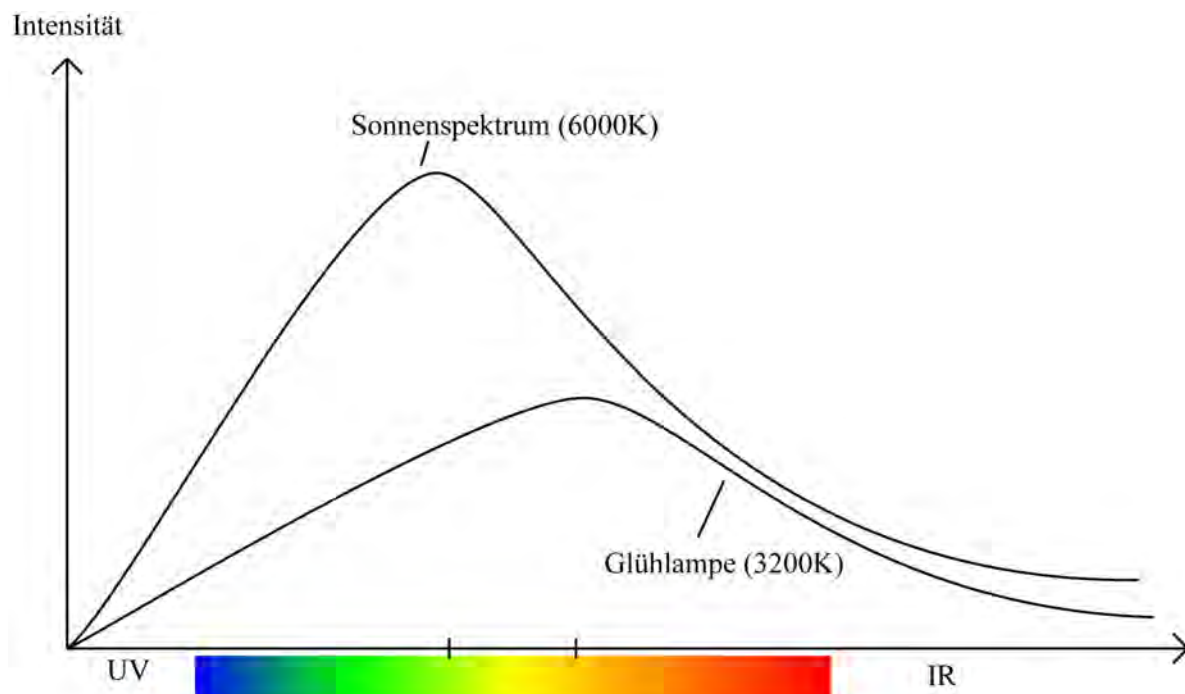


Abbildung 4.10: Spektrum einer Glühlampe und der Sonne

### 4.3.7 Welle-Teilchen-Dualismus und Zusammenfassung

Die Erscheinung von Interferenzmustern ist nicht die einzige Bestätigung der Wellennatur des Lichts. Eine weitere Eigenschaft des Lichts, die für Huygens Wellentheorie spricht, ist dessen Polarisierbarkeit. Sie wird in der Klasse experimentell nachgewiesen, indem zwei gegeneinander verdrehbare Polarisationsfolien vor der Linse eines Diaprojektors positioniert werden. Bei gleicher Durchlassrichtung beider Folien ist an einer Leinwand die maximale Lichtintensität wahrzunehmen. Dreht der Lehrer sie dagegen allmählich um 90 Grad gegeneinander, erfolgt eine zunehmende Verdunkelung. Dieser Versuch wird anschließend auch für drei Polarisationsfolien durchgeführt, wobei die Klärung der Beobachtung hier eine Zeichnung zur vektoriellen Aufspaltung der Schwingungsebene erfordert. Beide Versuche werden wie üblich erst am Folgetag besprochen. Es wird darauf verwiesen, dass diese Polarisations-eigenschaft zur Bestimmung des Zuckergehalts in Trauben genutzt werden kann, da Zuckermoleküle die Polarisations-ebene des Lichts drehen. Im letzten Teil dieser Versuchsreihe werden durchsichtige Folien vor den Diaprojektor gehalten und auseinandergezogen. Unter dieser Spannung treten an der Leinwand einige Farben auf. Diese epoptische Farbentstehung durch Oberflächeninterferenz (vgl. Abschnitt 3.3) wird im Unterricht aus Zeitmangel nicht mehr geklärt.

Zur Einleitung eines Versuches, der dem Wellencharakter des Lichts widerspricht, wiederholt der Lehrer gemeinsam mit der Klasse die verschiedenen Arten der Elektrizität und ihre Eigenschaften. Anschließend wird ein Zinkblech auf der metallischen Kontaktplatte eines geladenen Elektroskops positioniert und mit dem Licht einer Quecksilberdampflampe bestrahlt. Der Ausschlag der zuvor mit positiver Ladung versehenen Nadel geht daraufhin zurück, woraus auf eine Entladung geschlossen werden kann. Werden verschiedene Farbfilter zwischen Lampe und Elektroskop gehalten, erfolgt die Entladung nur bei demjenigen, der ultraviolette Strahlung durchlässt. Demnach scheint Licht genügend hoher Frequenz, und damit genügend hoher Energie (vgl. Abschnitt 4.3.6), Elektronen aus Metall herausschlagen zu können. Dieses Ausschlagen ist jedoch direkt verbunden mit der Vorstellung eines Impulses und damit einer Masse. Hier nimmt Licht offensichtlich Eigenschaften eines massebehafteten Teilchens an. Das Experiment kann mit einer Photozelle noch verfeinert werden. Die Schüler skizzieren sich das Modell der Photozelle in ihre Epochenhefte und fassen diesen sog. *lichtelektrischen Effekt* (Photoeffekt) schriftlich zusammen.

Trotzdem scheinen sie unzufrieden mit dem Ergebnis einer Dualität des Lichts. Der Lehrer erklärt, dass sich selbst einzelne Photonen bei Beschuss auf einen Doppelspalt verhalten wie eine Welle, d.h. sie scheinen durch beide Spalte hindurch zu verlaufen. Abschließend betont er jedoch, dass alle kennengelernten Theorien nur Modelle sind, welche die Realität möglichst gut beschreiben sollen, ihr deswegen aber nicht entsprechen. Mit diesen Gedanken werden die Schüler aus ihrer letzten Physikepoche entlassen.



## 5 Selbstgestaltete Unterrichtswoche

In der dritten Woche der Physikepoche wurde der Unterricht selbst geplant und gehalten. Auf diese Weise konnte ein Einblick in die Tätigkeiten eines Waldorfschullehrers erhalten werden. Dies wiederum ermöglicht, durch Reflexion eigener Unterrichtserfahrungen aus diversen studienbegleitenden Praktika an staatlichen Gymnasien, einen Vergleich der Unterrichtsgestaltung aus Sicht des Lehrers. Die Unterrichtsskizzen zu den einzelnen Stunden dieser Woche sind im Anhang 11.3 zu finden.

### 5.1 Rechenaufgaben und Konstruktionen zur Linsenabbildung

Um an die vorausgegangenen Physikstunden anzuknüpfen und die Schüler möglichst gut auf die bevorstehende Physikprobe am Ende der Woche vorzubereiten, werden sowohl die Abbildungsgleichung für Linsen (siehe Abschnitt 4.3.3), als auch Konstruktion der Strahlengänge wiederholt bzw. vertieft. Da eine kontinuierliche rechnerische Übung sinnvoll erscheint, werden täglich die ersten 30 bis 35 Minuten nach der Geometrieaufgabe des üblichen Rhythmisierungsteiles (vgl. Anhang 11.3) dazu genutzt, die Anwendung der Linsengleichung zu erweitern. Davon unabhängig werden im zweiten Teil jeder Unterrichtsstunde die Themen Beugung und Interferenz weitergeführt (siehe Abschnitte 5.2 bis 5.5). Außerdem wird in jeder Stunde eine kurze Pause von fünf bis zehn Minuten abgehalten.

Zu Beginn der ersten Unterrichtsstunde wiederholen die Schüler mündlich den Vorgang zur Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse (Konvexlinse) sowie die Linsengleichung. Sie haben bereits den Spezialfall kennengelernt, dass die Bildgröße  $B$  genau dann gleich der Gegenstandsgröße  $G$  ist, wenn die Gegenstandsweite  $g$  dem Doppelten der Brennweite  $f$  der abbildenden Linse entspricht. Nun soll auch geklärt werden, wie sich das Verhältnis  $\frac{B}{G}$  ändert, wenn  $g$  vergrößert oder verkleinert wird. Dazu wird der Faktor 2 in der Gleichung  $g = 2 \cdot f$  durch eine Variable  $a$  ersetzt. Dann lässt sich eine Abhängigkeit herleiten, welche an der Tafel schriftlich festgehalten wird.

$$\text{Es gilt} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (1)$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \stackrel{(1)}{\Rightarrow} \quad \frac{1}{f} &= \frac{1}{b} + \frac{1}{a \cdot f} \\ \frac{1}{b} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{a \cdot f} \\ \frac{1}{b} &= \frac{a-1}{a \cdot f} \quad | \text{stürzen} \\ b &= \frac{a \cdot f}{a-1} \end{aligned}$$

$$\stackrel{(2)}{\Rightarrow} \quad \frac{B}{G} = \frac{a \cdot f}{a-1}$$

$$\boxed{\frac{B}{G} = \frac{1}{a-1}} \quad (3)$$

Als Verständnisprobleme auftreten werden die einzelnen Schritte der Herleitung z.T. genauer erläutert. Schriftliche Nebenbemerkungen wie „stürzen“ helfen hierbei. Da einige Schüler zunächst Schwierigkeiten zu haben scheinen, was die Veranschaulichung der neuen Variablen  $a$  betrifft, wird an der Tafel kurzerhand noch eine grobe Skizze angefertigt, welche  $a$  als Stauchungs- oder Verzerrungsfaktor bzgl.  $f$  darzustellen versucht. Nun werden die Schüler aufgefordert, das Ergebnis aus Gleichung (3) zu überprüfen, indem sie  $a = 2$  setzen. Das Verhältnis  $\frac{B}{G} = \frac{1}{1}$  ist bestätigt und die Schüler werden darauf verwiesen, dass diese neue Gleichung gleichwertig verwendet werden kann, wie die bereits bekannte Gleichung (2). Dabei kann  $a$  sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Einem Schüler fällt jedoch sofort auf, dass die Gleichung für  $a = 1$  ungültig ist. Doch bei näherem Hinsehen erübrigt sich dieses Problem, denn für  $g = f$  steht der Gegenstand im Brennpunkt der Linse und es entsteht kein Bild.

Am zweiten Unterrichtstag werden zur Gleichung (3) Übungsaufgaben gestellt. Drei kurze Angaben werden an die Tafel geschrieben und die Schüler erhalten einige Minuten Zeit, um das Verhältnis  $\frac{B}{G}$  zu berechnen.

a)  $g = 1,5 \cdot f$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{1,5-1} = \frac{1}{0,5} = 2$$

Das entstehende Bild ist bei diesen Vorgaben also doppelt so groß wie der Gegenstand.

b)  $g = 6 \text{ cm}, f = 2 \text{ cm}$

$$a = 3 \Rightarrow \frac{B}{G} = \frac{1}{2}$$

Das Bild ist halb so groß wie der Gegenstand.

c)  $g = \frac{3}{4} \cdot f$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{-\frac{1}{4}} = -4$$

Das Bild ist viermal so groß wie der Gegenstand, befindet sich auf der selben Seite der Sammellinse wie dieser und steht aufrecht. Letztere zwei Eigenschaften können am negativen Vorzeichen des Verhältnisfaktors abgelesen werden. Diese Interpretation wird gemeinsam mit den Schülern anhand der Bildkonstruktion erarbeitet (siehe Abbildung 5.1). Das entstehende Bild ist nicht reell und kann demnach nicht auf einem Schirm dargestellt werden. Dennoch kann dieses sog. virtuelle Bild genutzt werden, z.B. bei einer Lupe. Auch hier wird der betrachtete Gegenstand innerhalb der Brennweite positioniert, sein vergrößertes Bild von der anderen Seite der Sammellinse aus von unserem Auge erfasst.

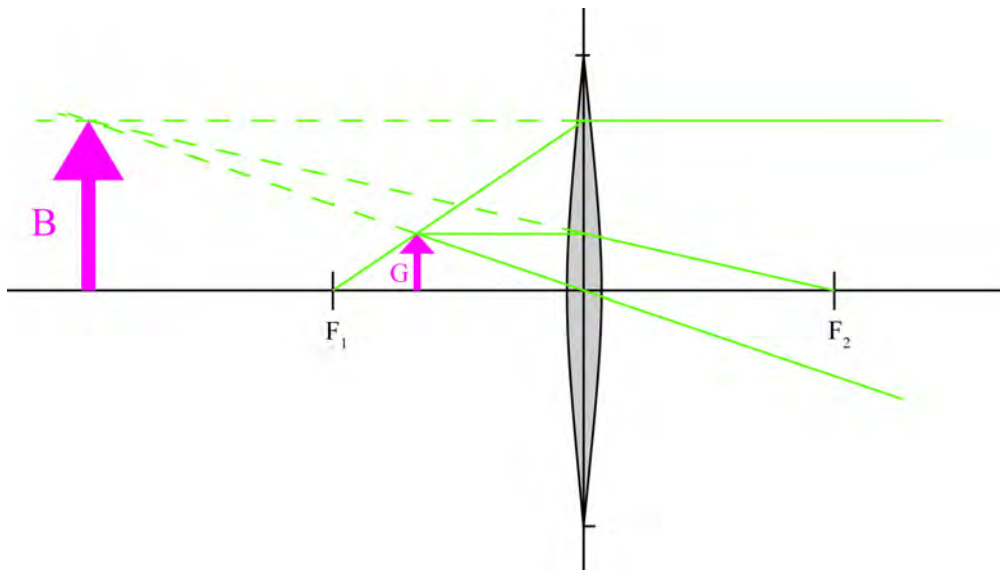


Abbildung 5.1: Konstruktion des virtuellen Bildes bei einer Sammellinse

Bei Blicken durch die Bankreihen der Klasse während der Berechnungen fällt auf, dass bei Umformungen der Brüche, insbesondere bei der Kehrwertbildung, noch einige Probleme bestehen. Daher findet auch die Besprechung der Lösungen schriftlich an der Tafel statt. Mit Hilfe dieser Beispiele und der Allgemeingültigkeit von Gleichung (3) lassen sich drei Fälle bei Abbildungen an einer Sammellinse unterscheiden. Sie werden an der Tafel schriftlich zusammengefasst:

- B ist für  $g > 2f$  reell und kleiner als G
- B ist für  $f < g < 2f$  reell und größer als G
- B ist für  $g < f$  nicht reell (virtuell) und größer als G

Die Spezialfälle  $g = 2f$  und  $g = f$  wurden bereits zuvor angesprochen und fallen aus dieser Zusammenfassung heraus.

Bisher wurden Bildkonstruktionen nur an Sammellinsen (Konvexlinsen) behandelt. Zur Einführung der Zerstreuungslinse (Konkavlinse) rufen sich die Schüler ihre Beobachtungen zum Lichtstrahlenverlauf aus vergangener Woche in Erinnerung. Der Physiklehrer erzeugte durch das Anbringen eines groben Gitters vor eine breite Lichtquelle, mehrere, vor schwarzem Hintergrund sichtbare Parallelstrahlen, welche senkrecht auf eine Zerstreuungslinse trafen. Ihr weitere Verlauf hinter der Linse war bei dieser Anordnung gut ersichtlich. Bei verschiedenen Auftreffpunkten auf der Linse, wurde auch das Verhalten einzelner Strahlbündel beobachtet. Die Schüler erinnern sich daher an eine Aufweitung des parallelen Strahlenbündels, und zwar so, als kämen alle Lichtstrahlen vom gegenstandsseitigem Brennpunkt ( $F_2$ ). Derjenige Strahl, welcher auf die Mitte der Linse trifft (zentraler Strahl), läuft unverändert hindurch, wohingegen derjenige Strahl, welcher auf den gegenüberliegenden Brennpunkt ( $F_1$ ) zielt, hinter der Linse zu einem Parallelstrahl wird. Die Konstruktion des Bildes bei einer Zerstreuungslinse nutzt eben diese drei Strahlenverläufe und ist damit der Konstruktion bei Sammellinsen sehr ähnlich.

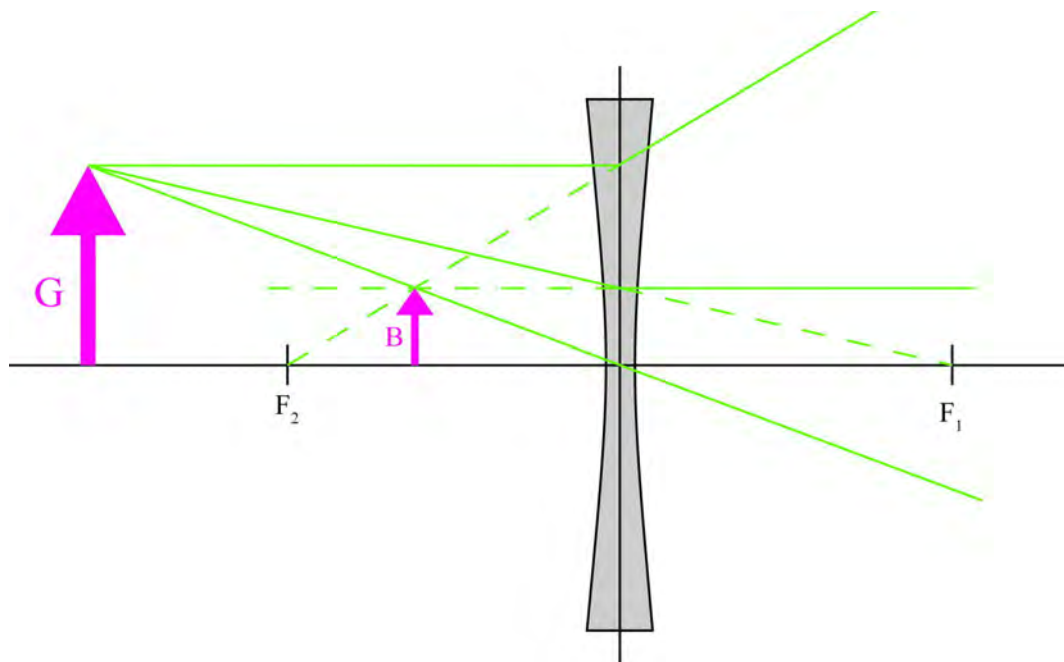


Abbildung 5.2: Konstruktion des virtuellen Bildes bei einer Zerstreuungslinse

Um die Gültigkeit der Linsengleichung auch für Zerstreuungslinsen zu erhalten, werden diesen negative Brennweiten zugeschrieben. Außerdem befindet sich der bildseitige Brennpunkt  $F_2$  in diesem Fall auch auf der Seite des Gegenstandes,  $F_1$  und  $F_2$  scheinen in der Konstruktionsskizze daher vertauscht. Die Schüler werden darauf verwiesen, dass auch das Aufrechtstehen des Bildes mathematisch Ausdruck findet in einem negativen Wert für  $B$  und in der Konstruktion durch einen Pfeil nach oben gekennzeichnet wird. Zur Rechenübung wird die Klasse in zwei Gruppen geteilt. Während die eine Hälfte der Schüler zu vorgegebenen Daten das Verhältnis  $\frac{B}{G}$  mittels der Gleichungen (1) und (2) berechnet, verwendet die zweite Hälfte hierzu Gleichung (3). Gegeben seien

$$g = 9 \quad f = -6$$

Es wird darauf verwiesen, dass Rechnungen dieser Art entweder ganz ohne Einheiten geführt werden oder diese konsistent mitgezogen werden müssen. In jedem Fall ist jedoch darauf zu achten, dass alle Daten in der selben Einheit vorliegen. Analog zum vergleichenden Tafelanschrieb sind im Folgenden beide Lösungswege aufgeführt.

Lösungsweg über Gleichung (1) & (2)

$$\begin{aligned} \frac{1}{b} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{g} \\ &= \frac{1}{(-6)} - \frac{1}{9} \\ &= -\frac{3}{18} - \frac{2}{18} \\ &= -\frac{5}{18} \\ b &= -\frac{18}{5} \\ \frac{B}{G} &= \frac{b}{g} = \frac{-\frac{18}{5}}{9} \\ &= -\frac{18}{5} \cdot \frac{1}{9} \\ &= -\frac{2}{5} \end{aligned}$$

Lösungsweg über Gleichung (3)

$$\begin{aligned} 9 &= a \cdot -6 \\ \Rightarrow a &= -\frac{9}{6} = -\frac{3}{2} \\ \frac{B}{G} &= \frac{1}{-\frac{3}{2} - 1} \\ &= \frac{1}{-\frac{5}{2}} \\ &= -\frac{2}{5} \end{aligned}$$

Beide Ergebnisse bestätigen wiederum die Gleichwertigkeit von Gleichung (3). In diesem Fall war der zweite Lösungsweg sogar kürzer. Die Schüler werden abschließend darauf verwiesen, dass sie sich auch in der Physikprobe selbst für eine Möglichkeit entscheiden dürfen.

## 5.2 Einfachste Beugungserscheinungen

Unter Beugung des Lichts versteht man sein Eindringen in den geometrischen Schattenraum eines Gegenstandes. Die Erscheinung lässt sich bereits mit sehr einfachen und alltäglichen Mitteln beobachten. So wurden zur Einführung drei Versuche gewählt, welche die Schüler selbstständig durchführen können. Dabei steht zunächst die reine Beobachtung im Vordergrund, d.h. die Versuche werden direkt hintereinander durchgeführt, um sofortige Erklärungsansätze unter den Schülern zu vermeiden.

### Versuch 1:

Während der Physikraum größtenteils abgedunkelt wird, befindet sich am Lehrerpult, im Blickfeld eines jeden Schülers, eine sehr hell leuchtende Glühlampe, die als beinahe punktförmige Lichtquelle anzusehen ist. Die Schüler werden nun aufgefordert, einen Bleistift oder Buntstift etwa eine Armlänge entfernt gegen die Lichtquelle zu halten, und zwar so, dass deren Zentrum gerade noch verdeckt wird. Es ist eine leichte Eindellung am Stift zu erkennen, je nach Breite sogar beidseitig, sodass er eine Taille erhält (siehe Abbildung 5.3).



Abbildung 5.3: Durch Beugung entstehende Taille an einem Stift

Einige Schüler führen den Versuch auch mit Geldmünzen durch und stellen hier ebenfalls eine Eindellung fest. Eine ähnliche Beobachtung kann man auch beim Sonnenauf- oder untergang hinter einem glatten Hügel machen. Die Sonnenstrahlen „beugen“ sich offensichtlich um die Hügelkuppe. Abbildung 5.4 zeigt, wie sich das Licht in eine gerade verlaufende Oberfläche „hineinzufressen“ scheint.



Abbildung 5.4: Beugung an einer geraden Messerklinge

### Versuch 2:

An die Schüler werden selbstgefertigte, schmale Einfachspalte ausgeteilt. Da die Spaltkanten möglichst dünn sein und geradlinig verlaufen sollten, werden hierfür die Außenkanten einer Rasierklinge verwendet. Bricht man dieses auseinander und klebt sie entsprechend in ein Fenster aus dunklem Tonpapier, erhält man die einfachste Form eines Einfachspaltes, wie sie Abbildung 5.5 zeigt.

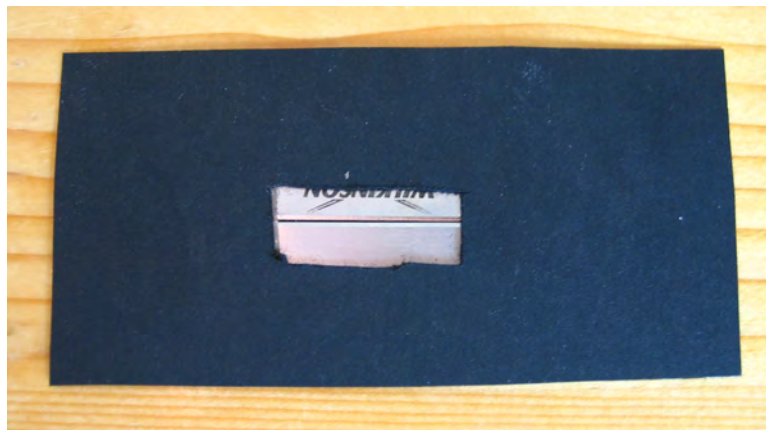


Abbildung 5.5: Handlicher Einfachspalt

Durch diesen Spalt hindurch sollen die Schüler mit einem Auge ein Tonpapiermuster mit weißem Gitter und schwarzen Fenstern anvisieren. Dabei wechselt die Ausrichtung des Spalts mehrmals zwischen horizontal und vertikal. Die Schüler beobachten, dass genau diejenigen weißen Gitterstreifen, welche parallel zur Spaltausrichtung verlaufen, unscharf erscheinen, zum Teil verschwimmen, während diejenigen, welche senkrecht verlaufen, sehr scharf von den schwarzen Fenstern getrennt sind.

Abbildung 5.6 zeigt ein Foto des Tonpapiermusters, das durch den horizontal ausgerichtetem Spalt hindurch geschossen wurde.

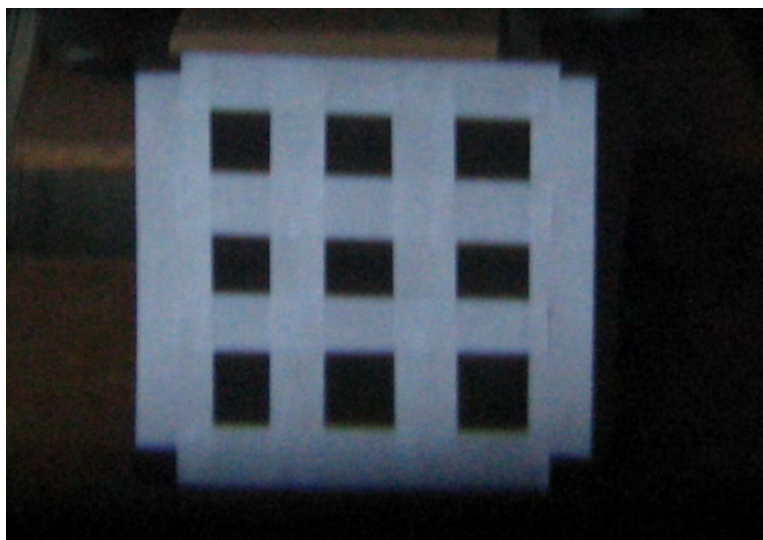
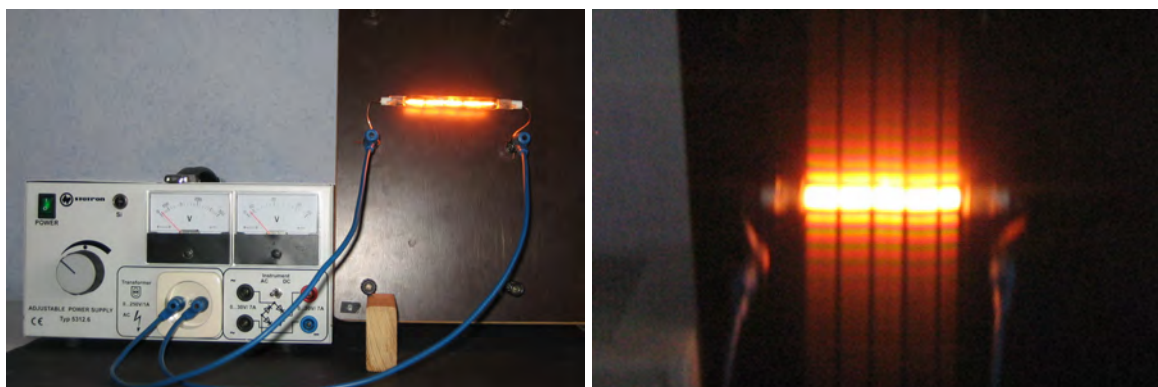


Abbildung 5.6: vertikale Verzerrung am schwarz-weiß-Muster

### Versuch 3:

Der Physikraum wird wieder etwas abgedunkelt. Über einen Transformator wird ein Halogenstab betrieben, der horizontal angebracht und für alle Schüler sichtbar ist. Vor dem dunklen Hintergrund der Befestigungsplatte sind die Unterteilungen der Glühwendel kaum wahrzunehmen (siehe Abbildung 5.7(a)). Die Schüler blicken nun durch ihren handlichen Einfachspalt, welcher parallel zum Halogenstab ausgerichtet ist. Die Lichtquelle scheint mit abfallender Intensität nach unten und oben hin vervielfacht. Durch diese vertikale Verzerrung werden auch die Glühwendelunterteilungen deutlich sichtbar, wie Abbildung 5.7(b) zeigt. Die Ränder dieser Vervielfachungen weisen außerdem Farben auf.



(a) Trafo und Halogenstab

(b) Blick auf Halogenstab durch parallelen Spalt

Abbildung 5.7: Beugungserscheinung am Halogenstab



Anschließend werden die Beobachtungen zusammengefasst und von den Schülern in ihre Epochenhefte gezeichnet. Lediglich Nummerierung und Titel der Versuche werden dabei angeschrieben. Der von den Schülern bisher verwendete Einfachspalt hatte eine feste, unveränderbare Breite. Hingegen soll in folgendem Demonstrationsversuch ein verstellbarer Spalt zum Einsatz kommen.

#### Versuch 4:

Im vorderen Teil des abgedunkelten Physikraumes ist auf einem Hochtisch ein Diaprojektor mit eingelegtem schmalen, vertikalen Spalt aufgebaut. Er liefert nun eine weiße, in horizontaler Richtung sehr kleine Lichtquelle. Möglichst nahe vor der Projektorlinse ist ein verstellbarer, vertikaler Einfachspalt positioniert, der bei aufgeweiteter Einstellung durch den schmalen Lichtstreifen gut ausgeleuchtet wird. Das Bild der eingelegten Spaltblende ist auf eine trübe Plexiglasscheibe fokussiert, die von der anderen Seite aus für alle Schüler sichtbar ist. Sie beobachten nun, wie sich der abgebildete Lichtstreifen bei Verengung des regulierbaren Einfachspaltes verändert. Der abgebildete Lichtstreifen wird dunkler und unschärfer, aber trotz Spaltverengung auch breiter und weist an den Seiten Farben auf, die bei kleinstmöglich einstellbarer Spaltbreite am deutlichsten zu sehen sind. Die Schüler laufen dazu in Reihe an der Scheibe vorbei und zeichnen anschließend ihre Beobachtungen in drei Stufen in ihre Epochenhefte. Abbildung 5.8 zeigt die Entwicklung des abgebildeten Lichtstreifens.

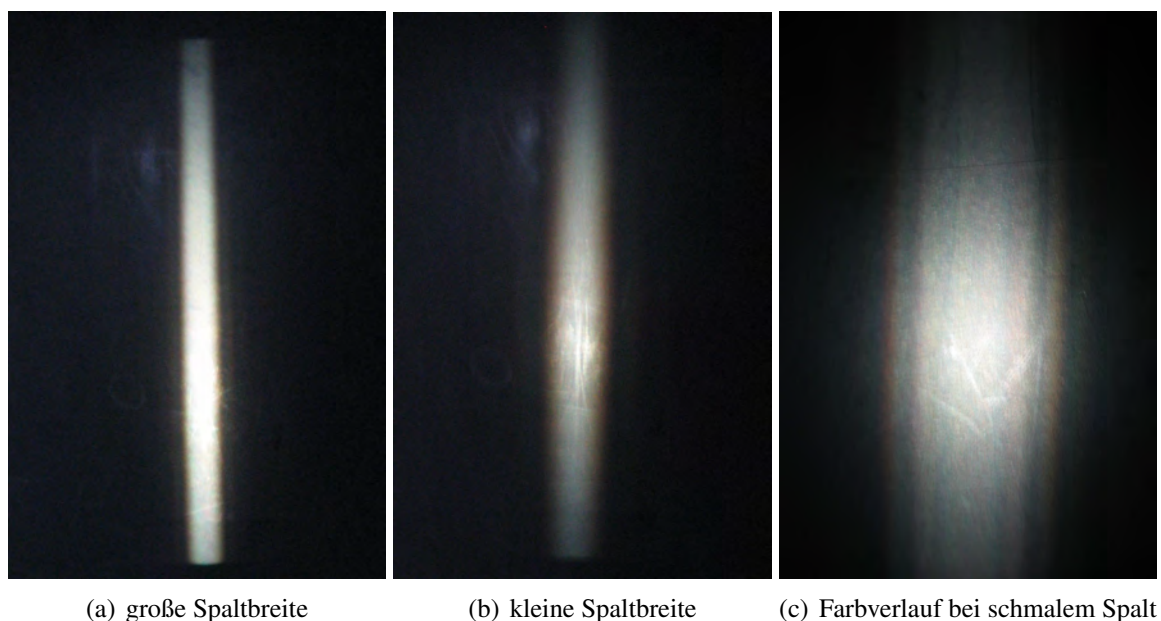


Abbildung 5.8: Beugung am verstellbaren Einfachspalt

Alle diese Versuche werden erst in der Unterrichtsstunde des nächsten Tages besprochen. Dabei wird ergänzend zu Versuch 1 zunächst der Begriff *Beugung* geklärt. In Versuch 2

verzerrt die Beugung des Lichts das Muster senkrecht zum Spalt, sodass die weißen Gitterstreifen, welche parallel zum Spalt verlaufen, in den schwarzen Kästchen verschwimmen. Diese Verzerrung durch Beugung des Lichts tritt auch in Versuch 3 auf. Dennoch wird das Licht des Halogenstabes nicht regelmäßig verzerrt sondern weist immer wieder dunkle und helle Stellen auf, die als Vervielfachung der Lichtquelle zu beschreiben sind. Diese Erscheinung, sowie das Auftreten von Farben, können an dieser Stelle noch nicht genauer erklärt werden. Erst die Inhalte der folgenden Unterrichtsstunden (siehe Abschnitt 5.5) liefern die notwendigen Verständnisgrundlagen. Durch Versuch 4 wird deutlich, dass die Beugung erst bei sehr kleiner Spaltbreite sichtbar ist. Doch auch die Erklärung der hierbei auftretenden Farben an den Rändern des weißen Lichtstreifens wird vertagt.

### 5.3 Beobachtung der Beugung am Mehrfachspalt

Die Schüler erkennen schnell den Widerspruch der Korpuskeltheorie Newtons zu den Beobachtungen der vergangenen Versuche, insbesondere zu Versuch 4. Obwohl die Lichtteilchen senkrecht auf den Spalt treffen, weichen sie anschließend offenbar von ihrer Flugbahn ab. Ein Schüler bemerkt jedoch, dass dieses Verhalten durchaus durch Stöße am Spaltrand zu erklären sei. Damit ist jedoch nicht das Auftreten von Farben in Versuch 4 klar. Erst recht die Beobachtungen im folgenden Versuch beleben den Widerspruch aufs Neue.

#### Versuch 5:

Im hinteren Teil des abgedunkelten Klassenzimmers ist ein Diaprojektor so aufgestellt, dass das Bild des eingelegten Spaltes gut auf der Leinwand im vorderen Teil des Raumes zu sehen ist. Analog zu Versuch 4 stellt er auf diese Weise eine kleine Lichtquelle dar. Direkt vor dem Projektor ist eine Blendenhalterung angebracht, in die während der Versuchsdurchführung verschiedene Spalt- und Gitterblenden eingelegt werden.

#### a) Mehrfachspalte mit festem Spaltabstand

Zunächst wird ein Doppelspalt in die Blendenhalterung geklemmt. An der Leinwand ist mittig der vertikale, weiße Lichtstreifen zu sehen. An beiden Seiten treten Farben auf, die zwar schwach, aber deutlicher als in Versuch 4 erscheinen. Eine Schülerin der ersten Bankreihe beschreibt den Farbverlauf von Innen nach Außen: Violett, Blau, Grün, Orange, Rot. Im weiteren Verlauf wird der Doppelspalt durch einen Dreifachspalt und anschließend durch einen Vierfachspalt ersetzt, wobei sich der Spaltabstand nicht ändert. Wie zu erwarten, erscheint der weiße Streifen nun heller, da mehr Spalte durchleuchtet werden. Mit zunehmender Anzahl der Spalte, wird das Gesamtbild schärfer und auch die Farben, sowie deren Verlauf deutlicher. Zudem beschreiben Schüler nahe der Leinwand eine Inhomogenität innerhalb des Hauptstreifens. Er scheint genau genommen aus mehreren einzelnen Lichtstreifen zu bestehen.

**b) Mehrfachspalte mit unterschiedlichen Spaltabständen**

Während die Spaltabstände bei Doppel-, Dreifach- und Vierfachspalt alle gleich waren, werden nun drei Mehrfachspalte (Transmissionsgitter) mit verschiedenen Gitterkonstanten  $d$  in die Blendenhalterung eingesetzt. Dabei wird lediglich die Anzahl der Spalte pro Längeneinheit bekanntgegeben, während die Schüler kommentarlos die Entwicklung der Leinwandprojektion beobachten. Erst im Anschluss sollen die Eindrücke in der Klasse zusammengefasst werden. Viele Schüler machen sich dabei selbstständig Notizen in ihre Epochenhefte (siehe Anhang 11.6):

Beginnend mit 80 Strichen pro cm ( $d = 0,125\text{mm}$ ) ist zunächst mittig ein sehr heller, weißer Streifen zu sehen, welcher keine Inhomogenität mehr aufweist. Die sichtbaren Farbstreifen schließen nicht mehr direkt an den Hauptstreifen an, sondern sind durch dunkle Abschnitte von ihm getrennt. Die Schüler verweisen außerdem auf deren Achsensymmetrie bzgl. des Hauptstreifens. Erstmals ist eine Wiederholung der Farbverläufe zu erkennen, wobei die Reihenfolge stets die selbe bleibt. Alle diese weiteren Farbstreifen sind ebenfalls symmetrisch und werden nach außen hin schwächer und unschärfer.

Nach Einsatz des zweiten Transmissionsgitters (250 Striche pro cm) sind die Abstände der Farbstreifen zum Mittelstreifen deutlich größer. Außerdem sind die Farben sehr viel besser zu erkennen und heben sich stärker voneinander ab. Abbildung 5.9 zeigt das Beugungsmuster an der Leinwand mit eingezeichnetem Abstand  $a$  für den ersten grünen Farbstreifen.

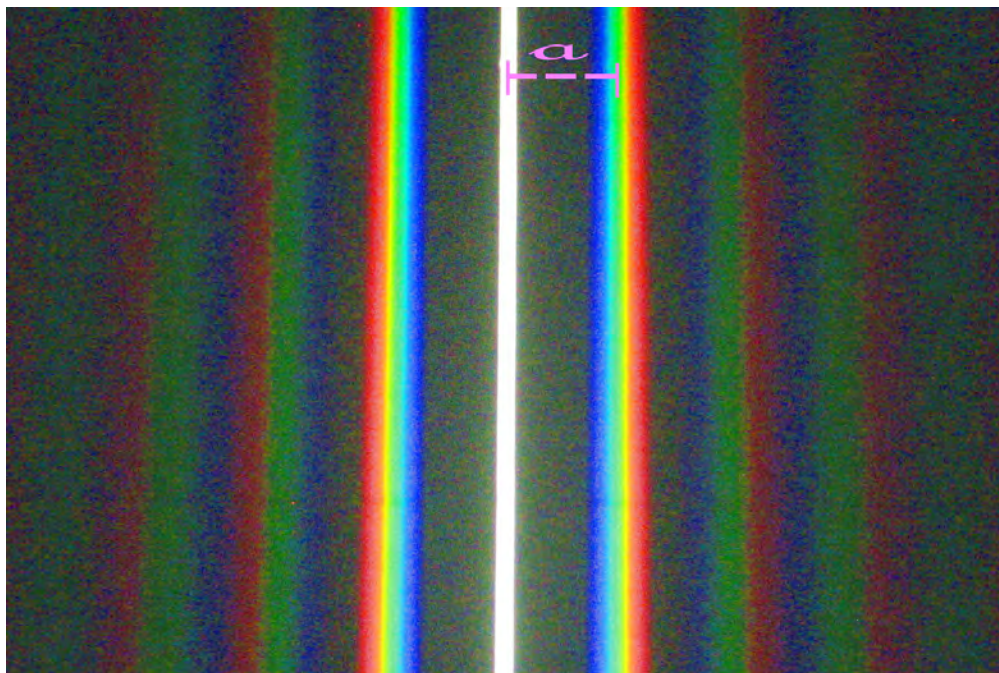


Abbildung 5.9: Beugungsmuster bei einem Gitter mit 250/cm

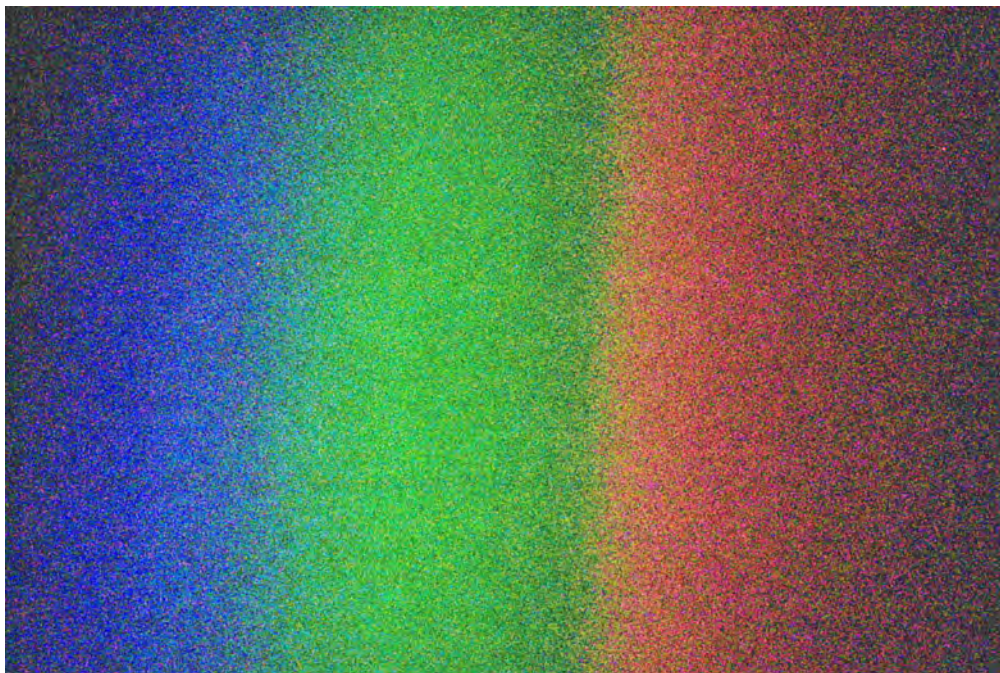


Abbildung 5.10: rechtsseitige Farbstreifen bei einem Gitter mit 600/mm

Um beim dritten Transmissionsgitter (600 Striche pro mm) die ersten Farbstreifen erkennen zu können, wird die Leinwand etwa zwei Meter weiter nach außen gestellt. So ist zwar der weiße Mittelstreifen nicht mehr zu sehen, dafür aber ein beeindruckend großflächiger Farbverlauf, wie ihn Abbildung 5.10 zeigt.

Nach Durchführung des Versuchs und Verweis auf die Symmetrie der Streifen wird erneut das Gitter mit 250 Strichen pro cm in die Blendenhalterung geklemmt. Zwei Schüler messen nun den Abstand  $a$  verschiedener Farben des ersten und deutlichsten Farbverlaufes zum Hauptstreifen. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 5.1 zu finden. Eine geometrische Übersicht der Versuchsanordnung wird an die Tafel gezeichnet (siehe Abbildung 5.11) und die gesuchte Länge  $l$  zwischen Lichtquelle und Leinwand ebenfalls von den Schülern gemessen. Es ist  $l = 6m$ .

Farbe	violett	grün	orange	rot
Abstand $a/cm$	6,0	7,0	8,5	9,5

Tabelle 5.1: Werte für  $d = 0,04mm$  und  $l = 6m$

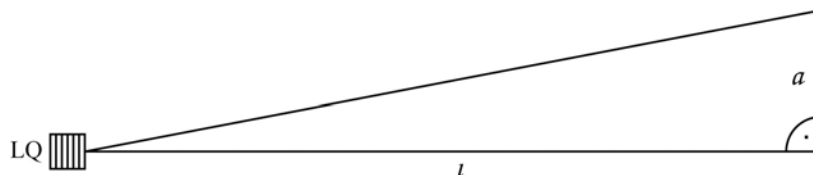


Abbildung 5.11: Geometrie des Versuchsaufbaus

Die Beobachtungen zu Versuch 5 werden am Folgetag in einem Schaubild an der Tafel nochmals zusammengefasst. Im Anschluss betrachten die Schüler den Strahlengang zwischen Gitter und Leinwand. Diese detaillierte Geometrie (siehe Abbildung 5.12) zeichnen sie in ihre Epochenhefte.

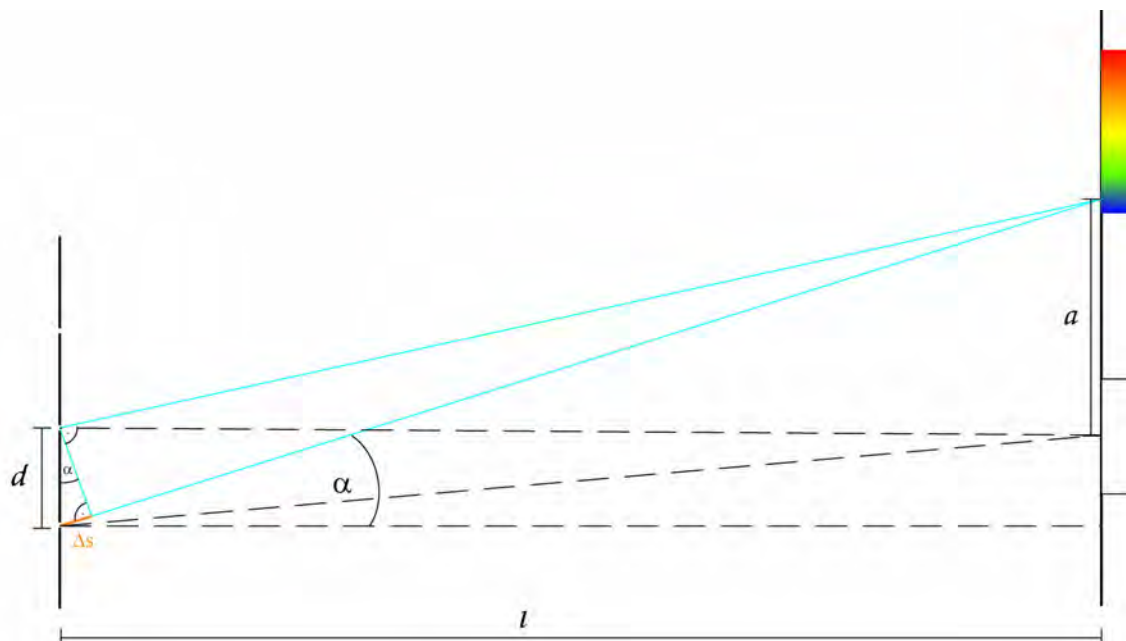


Abbildung 5.12: detaillierte Skizze zur Geometrie in Versuch 5

Der Spaltabstand  $d$ , die Länge  $l$ , sowie der Abstände  $a$  der verschiedenen Farbstreifen sind bekannt. Da  $l$  im Vergleich zu  $a$  sehr groß ist, können die beiden austretenden Strahlen als parallel angenommen werden. Die beiden mit  $\alpha$  bezeichneten Winkel sind gleich. Unter Vernachlässigung von  $d$  bzw.  $\frac{d}{2}$  gegenüber  $a$  gilt

$$\tan \alpha = \frac{a}{l} \quad (4)$$

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{d} \quad (5)$$

Hierbei bezeichnet  $\Delta s$  den Gangunterschied der beiden Lichtstrahlen. Da  $a$  für jede Farbe einen anderen Wert annimmt, sind auch die  $\Delta s$  verschieden. Die Schüler beginnen mit einer selbstständigen Berechnung von  $\alpha$ . Anschließend kann auch  $\Delta s$  ermittelt werden:

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha$$

Da die laufende Unterrichtsstunde mit einer weiteren Versuchsbeobachtung abschließen soll, um die Schüler mit neuen Eindrücken zu entlassen, wird an dieser Stelle mit Versuch 6 fortgefahren (siehe Abschnitt 5.4).

Die Schüler beenden bis zum Folgetag die Berechnung der Gangunterschiede aus den Werten der Tabelle 5.1. Diese wird bei der gemeinsamen Besprechung der Ergebnisse an der Tafel vervollständigt (siehe Tabelle 5.3). Zur Verdeutlichung der Größendimension von  $\Delta s$  wird zuvor eine Übersicht der wichtigsten Vorsätze erarbeitet, welche der Beschreibung von dezimalen Teilen oder Vielfachen physikalischer Einheiten dienen (siehe Tabelle 5.2).

<i>M</i>	Mega	$10^6$	= 1000000	
<i>k</i>	Kilo	$10^3$	= 1000	
<i>d</i>	Dezi	$10^{-1}$	= 0,1	= $\frac{1}{10}$
<i>c</i>	Zenti	$10^{-2}$	= 0,01	= $\frac{1}{100}$
<i>m</i>	Milli	$10^{-3}$	= 0,001	= $\frac{1}{1000}$
$\mu$	Mikro	$10^{-6}$	...	...
<i>n</i>	Nano	$10^{-9}$	...	...
<i>p</i>	Piko	$10^{-12}$	...	...
<i>f</i>	Femto	$10^{-15}$	...	...

Tabelle 5.2: Vorsätze für Einheiten

Farbe	violett	grün	orange	rot
Abstand $a/cm$	6,0	7,0	8,5	9,5
Winkel $\alpha/^\circ$	0,57	0,67	0,81	0,91
$\Delta s/nm$	400	467	566	633

Tabelle 5.3: Vervollständigung der Tabelle 5.1

Die Schüler werden abschließend darauf verwiesen, dass der Doppelspaltversuch bereits 1802 von dem englischen Physiker und Augenarzt Thomas Young durchgeführt wurde. Im Jahre 1821 bestimmte Joseph Fraunhofer bei Beleuchtung eines Gitters erstmals die Gangunterschiede für verschiedene Farben. Auf Grund der Ergebnisse beider Versuchsreihen konnte Newtons Teilchentheorie nicht weiter aufrechterhalten bleiben.

## 5.4 Das Huygenssche Prinzip

Die Theorie Newtons, Licht bestünde aus verschiedenen schweren, farbigen Teilchen, lässt sich nicht länger mit den beobachteten Versuchsergebnissen vereinbaren. Die regelmäßige und feine Aufspaltung des Lichts in Farben nach Durchquerung mehrerer Spalte (vgl. Abschnitt 5.3) ist durch Stöße umherfliegender Korpuskeln nicht zu erklären. Zudem bemerkt ein Schüler, dass nach Newton Farben nur dort entstehen dürften, wo weißes Licht in ein anderes Medium eindringt. Auch dies ist beim Doppel- und Mehrfachspalt nicht der Fall. Bereits zu Zeiten der Versuche von Young und Fraunhofer musste also nach einer anderen Erklärung gesucht werden. Im Jahre 1690 veröffentlichte der niederländische Physiker Christiaan Huygens eine andere Theorie: Licht könne als Welle beschrieben werden.

**Versuch 6:**

Das Verhalten von Wellen beobachtet man am einfachsten in Wasser. Daher wird für diesen Versuch eine mit Wasser gefüllte, durchsichtige Wellenwanne auf den Tageslichtprojektor gelegt. Ist dieser genügend unscharf eingestellt, können bereits kleine Unregelmäßigkeiten an der Wasseroberfläche auf einer großen Leinwand dargestellt werden. Bei leicht abgedunkelten Zimmer können die Schüler drei verschiedene Verhaltensformen von Wasserwellen betrachten. Von einem Elektromotor betrieben, kann die Frequenz verschiedener Aufsätze, welche die Wasseroberfläche knapp berühren, geregelt werden. Über einen Transformator wird die Drehzahl des Elektromotors so weit hochgefahren, bis die Wellenlänge kurz genug ist, um mehrere Wellenschläge an der Projektion beobachten zu können.

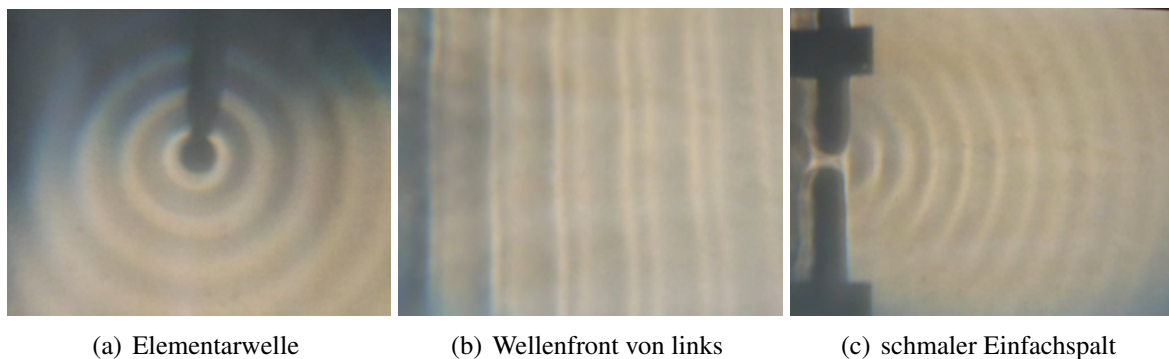


Abbildung 5.13: Beobachtungen an der Wellenwanne

**a) Elementarwelle**

Zunächst wird ein Einzelanreger aufgesetzt. Die punktförmige Anregung ruft sich radial ausbreitende Wellenzüge hervor, wie sie Abbildung 5.13(a) zeigt. Dabei haben die sichtbaren Kreisringe alle den gleichen Abstand zueinander. Diese einfachste Wellenform wird als Elementarwelle bezeichnet.

**b) Mehrfachanregung**

Der Aufsatz besteht nun aus einer Schiene mit vielen einzelnen Anregepunkten, die dicht beieinander positioniert sind. Wie in Abbildung 5.13(b) zu sehen, entsteht eine Wellenfront. Sie ergibt sich nach Huygens aus der Einhüllenden aller erzeugten Elementarwellen. Diese selbst sind kaum noch wahrzunehmen.

**c) Wellenfront am Spalt**

Parallel zur Wellenfront werden zwei längliche Widerstände so in der Wellenwanne positioniert, dass sie einen Spalt bilden, der viel größer ist als die Wellenlänge. Die Wellen breiten sich kaum in den Bereich hinter der Barriere aus. Verkleinert man den Spalt auf weniger als einen Zentimeter, entsteht dort scheinbar eine neue Elementarwelle (siehe Abbildung 5.13(c)).

Die Beobachtungen der Schüler werden am Folgetag durch einen Tafelanschrieb zusammengefasst, ebenso das Huygenssche Prinzip (1690):

- Licht breitet sich in Form einer räumlichen Welle aus
- Dabei wird jeder Punkt der Welle als Ausgangspunkt einer Elementarwelle (mit gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz) betrachtet
- Die Einhüllende der Elementarwellen ergibt die neue Wellenfront zum späteren Zeitpunkt

Um das Problem des tragenden Mediums ins Gespräch zu bringen, wird die Frage nach dem Unterschied zwischen Licht und anderen Formen von Wellen gestellt. Denn während Wasserwellen von Wasser, Schallwellen von Luft und Seilwellen von festem Material getragen werden, ist das tragende Medium des Lichts unbekannt. Unter der Annahme, dass alle Wellen dieses benötigen, ging Huygens von einem starren, reinen und annähernd massefreien Medium aus, dem sog. *Äther*, der auch im Weltraum vorliegt. Licht wird in ihm durch mechanische Stöße fast verlustfrei übertragen. Diese Vorstellung war lediglich eine Hypothese und wurde später widerlegt (vgl. Abschnitt 4.3.5).

Die Schüler skizzieren ihre Beobachtungen an der Wellenwanne in die Epochenhefte. Dabei wird die Wellenfront aus Versuchsteil b) als Umhüllende aller elementaren Anregungen eingezeichnet. Die Schülerschaft ist sich einig, dass die Wellentheorie zur Erklärung des Beugungsphänomens geeigneter ist, als Newtons Korpuskeltheorie. Offen bleibt lediglich, wie am breiten Einfachspalt die Stellen ohne Wellen zu Stande kommen. Dieser Effekt wird im nächsten Versuchsteil noch deutlicher.

#### d) Doppelspalt

Der Einfachspalt aus Versuchsteil 6c) wird durch Hinzufügen einer weiteren Barriere zu einem Doppelspalt mit kleiner Spaltbreite umfunktioniert. Abbildung 5.14 zeigt eindeutig helle Linienbereiche, in denen keine Wellen auftreten.

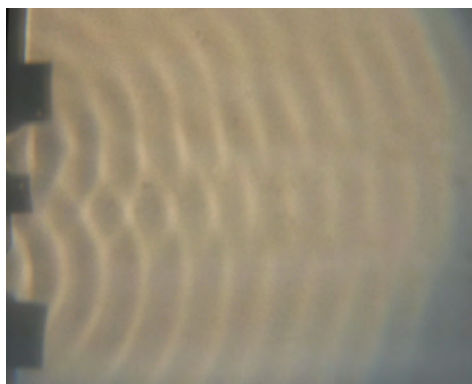


Abbildung 5.14: Wasserwellen am Doppelspalt



## 5.5 Der Interferenzbegriff

Im Anschluss an Versuchsteil 6d) werden zwei kleine Plexiglasplatten, von der Form, wie sie Abbildung 5.15(a) zeigt, nebeneinander auf den Tageslichtprojektor gelegt. Sie zeigen das Bild jeweils einer Elementarwelle, die sich halbkreisförmig ausbreitet. Nun werden beide Plexiglasplatten übereinander gelegt. Ähnlich zum Wellenmuster beim Doppelspalt sind hier radial verlaufende, helle Streifen zu erkennen, in welche die Welle scheinbar nicht eindringt (siehe Abbildung 5.15(b)).

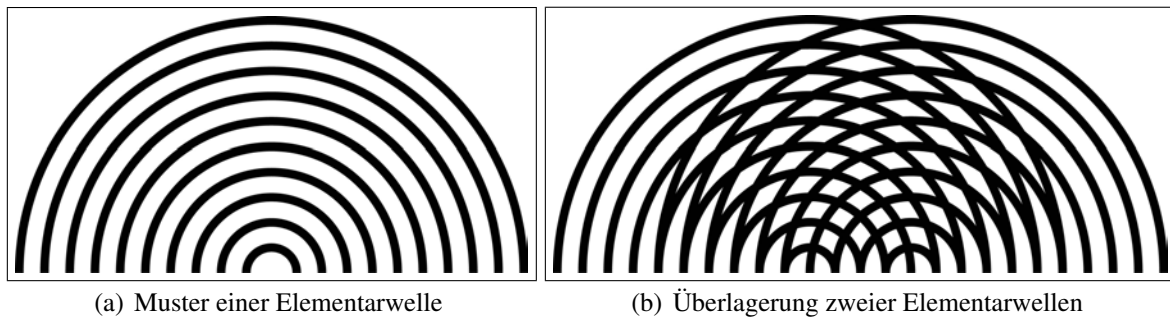


Abbildung 5.15: einfachste Überlagerungserscheinungen

Die Schüler erhalten einen Papierausdruck dieser Halbkreisüberlagerung. Erneut wird die Frage aufgegriffen, wie sich nun die Bereiche ohne Wellen erklären lassen. Zur Hilfestellung werden zwei Wellenzüge an die Tafel skizziert, die sich gedanklich aufeinander zubewegen. Zusätzlich werden Vektorpfeile eingezeichnet, welche die Auslenkung aus der Ruhelage wiedergeben. An dieser Stelle wird nach Erkenntnissen aus der Mathematik gefragt, denn die Eigenschaften der Vektoren, insbesondere die Vektoraddition, können hier zur Klärung genutzt werden. Mit diesem Hinweis kommen die Schüler schnell zu der Einsicht, dass sich beim Aufeinandertreffen zweier Wellenzüge positive und negative Auslenkung addieren und sich damit gegenseitig aufheben können. Das Wasser scheint an diesen Stellen in Ruhe. Da die Wellen in anderen Bereichen jedoch wieder auftreten, muss angenommen werden, dass die beiden Wellenzüge nach ihrer Begegnung wieder unbeeinträchtigt auseinanderlaufen. Diese Überlagerungserscheinung, bei der es sowohl zu Auslöschung von Wellen (destruktive Überlagerung), als auch zu deren Amplitudenverdoppelung (konstruktive Überlagerung) kommen kann, nennt man *Interferenz*. Es folgt eine kurze Zusammenfassung durch ein Diktat. Abbildung 5.12 mit eingezeichnetem Gangunterschied wird erneut an die Tafel skizziert. Es stellt sich nun die Frage, wie die eben erläuterten Eigenschaften von Wasserwellen nun auf Lichtwellen übertragen werden können und wie sich damit die Beobachtungen aus Versuch 5 erklären lassen. Ein Schüler erkennt, dass der Gangunterschied  $\Delta s$  an den hellen Stellen der Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts entspricht. Daraus folgt direkt, dass jede Farbe des Lichts eine andere Wellenlänge besitzt, da die Abstände  $a$  und damit auch alle  $\Delta s$  verschieden

sind. Farbige Licht scheint demnach dort besonders intensiv, wo konstruktive Überlagerung erfolgt. Am mittleren weißen Streifen ist der Gangunterschied gleich Null, sodass sich hier die Wellen jeder Farbe konstruktiv überlagern. Als Mischung etwa gleichintensiver, farbiger Streifen erhält man den weißen Hauptstreifen. Stellt sich nun noch die Frage nach der Symmetrie zum Mittelstreifen. Hierzu wird in Abbildung 5.12 der Strahlengang nach unten gespiegelt. Die Schüler erkennen schnell, dass sich bei gleichem, neu eingezeichneten  $\Delta s$  nach unten hin wieder der gleiche Abstand  $a$  ergibt. Schwieriger dagegen ist die Frage nach den weiteren, sich nach außen hin wiederholenden Farbverläufen zu beantworten. Dazu sollen sich die Schüler überlegen, welche Werte  $\Delta s$  annehmen muss, damit es zu wieder zu einer konstruktiven Überlagerung kommt. Die Wellenzüge müssen sich hierzu um ein ganzes Vielfaches ihrer Länge  $\lambda$  überholen, damit an der Leinwand wieder „Berg auf Berg“ und „Tal auf Tal“ treffen. Mit der Vorstellung, dass für alle Gangunterschiede, welche Vielfachen einer Wellenlänge entsprechen, an den zugehörigen Stellen Farbstreifen entstehen, haben die Schüler noch Probleme. Die grundlegende Idee zur Erklärung solcher *Interferenzmuster* ist der Klasse jedoch klar. Eine Vertiefung und Wiederholung mit rechnerischen Übungen werden vom Physiklehrer in der folgenden Unterrichtswoche fortgesetzt (siehe Abschnitt 4.3.4 bzw. Anhang 11.2).

### Versuch 7:

Zum Abschluss der Unterrichtsstunde sollen die Schüler beim Verlassen des Physikraumes auf einen akustischen Effekt achten. Während sie langsam den Lehrertisch passieren, werden auf diesem durchgängig zwei weit auseinander stehende Stimmgabeln mit dem Kammerton  $a$  ( $f = 440\text{Hz}$ ), wie sie Abbildung 5.16 zeigt, angeschlagen.



Abbildung 5.16: Stimmgabeln mit Schlegel

Im Anschluss an die Physikprobe werden am nächsten Tag ihre Eindrücke zu Versuch 7 zusammengefasst. Einige Schüler bemerkten beim Hinausgehen eine Intensitätsschwankung in der Lautstärke. Da jedoch der Großteil der Klasse dies unter dem Zeitdruck des Vortages nicht wahrgenommen hat, wird der Versuch erneut durchgeführt. Die Schüler stehen auf ihrem Platz und machen wiederholt einen Schritt zur Seite und wieder zurück, während die Stimmgabeln angeschlagen werden. Jetzt stellen alle Schüler fest, dass sie bei ihrer Bewegung Bereiche schwacher und Bereiche starker Intensität passieren. Da Schallwellen dieser Frequenz etwa eine Wellenlänge von 75cm haben, ist dieser Effekt durchaus der Interferenz zuzuschreiben. Der Klasse wird mit diesem Versuch klar, dass sich die Überlagerung von Wellen nicht nur auf Licht oder Wasserwellen beschränkt.

### Versuch 8:

Trotz Physikprobe soll diese Unterrichtsstunde wie gewohnt mit einem neuen Versuch abschließen, damit die Beobachtungen in der darauffolgenden Woche wieder vom Physiklehrer aufgegriffen werden können. Auf dem Lehrertisch steht eine Quecksilberdampf Lampe, deren Licht auf ein Transmissionsgitter (576 Striche pro mm) gebündelt wird. Bei abgedunkeltem Raum sind in etwa zwei Meter Abstand auf einem Bogen weißen Papieres, welcher an der Tafel befestigt ist, deutlich voneinander abgegrenzte, farbige Linien zu sehen. Es treten jedoch nur wenige Farben auf (violett, grün, orange), die Lampe scheint demnach nur bestimmte Wellenlängen zu emittieren. Hält man neben die innerste blaue Linie ein zusätzliches weißes Blatt Papier, welches üblicherweise optische Aufheller enthält, so sind zwei weitere Farblinien im ultravioletten Bereich zu sehen. Ein Schüler markiert am Papier die Stellen der Farblinien. Anschließend werden ihre Abstände  $a$  zur weißen Hauptlinie gemessen, ebenso der genaue Abstand  $l$  zwischen Gitter und Tafel. Nach Notation der Werte in einer Tabelle, werden die Schüler mit ihren neuen Eindrücken aus der letzten Unterrichtsstunde der selbstgestalteten Woche entlassen.

Für  $l = 188,5\text{cm}$  werden in der nächsten Physikstunde die zugehörigen Wellenlängen  $\lambda$  gemeinsam in der Klasse berechnet (vgl. Abschnitt 4.3.4). Tabelle 5.4 zeigt eine Übersicht aller ermittelten Werte.

Farbe	- UV -		violett	grün	orange
Abstand $a/\text{cm}$	39	44	48	61	66
Winkel $\alpha/^\circ$	11,7	13,3	14,3	19,0	19,2
Wellenlänge $\lambda/\text{nm}$	351	399	427	533	568

Tabelle 5.4: Linien einer Quecksilberdampf Lampe

## 5.6 Gestaltung und Auswertung der Physikprobe

Zur Abrundung sowie zur Lernmotivation der Schüler, wurde am Ende der selbstgestalteten Unterrichtswoche eine Physikprobe in der Klasse gehalten. Diese sollte inhaltlich die gesamte Woche umfassen, ausgenommen der Interferenz, die am Vortag nicht mehr ausführlich reflektiert wurde. Es wurde darauf geachtet, dass dabei die Art der Fragestellungen sowie der Mathematikanteil ähnlich der ersten Probe sind, welche eine Woche zuvor vom Physiklehrer gestellt worden war. Hierbei hatten 3 von insgesamt 11 Einzelaufgaben rechnerische Bearbeitung gefordert. An der zweiten Probe nahmen nun 12 Schüler und 11 Schülerinnen teil. In den 12 Teilaufgaben war nur einmal eine konkrete Rechnung gefordert, da für das Skizzieren eines Versuchsaufbaus und für eine genaue Konstruktion eines Bildes ebenfalls genügend Zeit eingeplant werden musste. Alle weiteren Aufgaben verlangten, analog zur ersten Probe, das Verständnis behandelter Phänomene und Beschreibungen der Versuche ab.

Bei den Fragen nach Nutzung virtueller Bilder und nach der Widersprüchlichkeit zwischen dem Beugungsphänomen und Newtons Teilchentheorie waren eigene Kritikfähigkeit und freie Argumentation gefordert. Mit durchschnittlich 0,9 von 2 Punkten konnten durchaus gute Gründe gegen die Teilchentheorie aufgezeigt werden, wohingegen die Verwendungszwecke virtueller Bilder mit durchschnittlich 0,5 von 2 Punkten häufig nicht ausreichend begründet wurden. Der Unterschied zwischen Schülern und Schülerinnen wurde besonders deutlich bei den Skizzen und Konstruktionen sowie Zeichnungen zu Beobachtungen (Aufgaben 1a, 2b und 4c). Hier schnitten die Mädchen größtenteils auf Grund sauberer Zeichnungen deutlich besser ab. Auch unter Einbezug aller anderen Aufgaben lagen sie mit durchschnittlich 17,5 von 34 Punkten gut über dem Gesamtdurchschnitt von 16,2 Punkten. Die beste Arbeit lieferte daher auch eine Schülerin mit 28 Punkten ab. Verglichen mit den Ergebnissen der ersten und dritten Physikprobe (50,6% und 50,4%), fiel diese selbstgestaltete Probe mit 47,6 % der erreichbaren Punkte zwar etwas schlechter, aber im akzeptablen Rahmen aus und war laut Schülerumfrage (siehe Anhang 11.5) auch nicht zu anspruchsvoll gestellt worden. Tabelle 5.5 zeigt die aufgabenspezifische Punkteverteilung zwischen Schülern und Schülerinnen in Prozent. Man beachte, dass es sich hierbei um gerundete Werte handelt. Die Diagramme der Abbildung 5.17 stellen die Häufigkeiten der erzielten Punkte in Prozent gegenüber.

Aufgabe	1a	1b	2a	2b	2c	2d	3a	3b	4a	4b	4c	4d	gesamt
w	51	36	55	73	73	32	30	32	64	52	61	45	51
m	45	50	46	57	50	46	19	21	54	36	47	46	43
gesamt	48	43	51	65	62	39	25	27	59	44	54	46	47

Tabelle 5.5: durchschnittliche Punkteverteilung der 2. Physikprobe in %

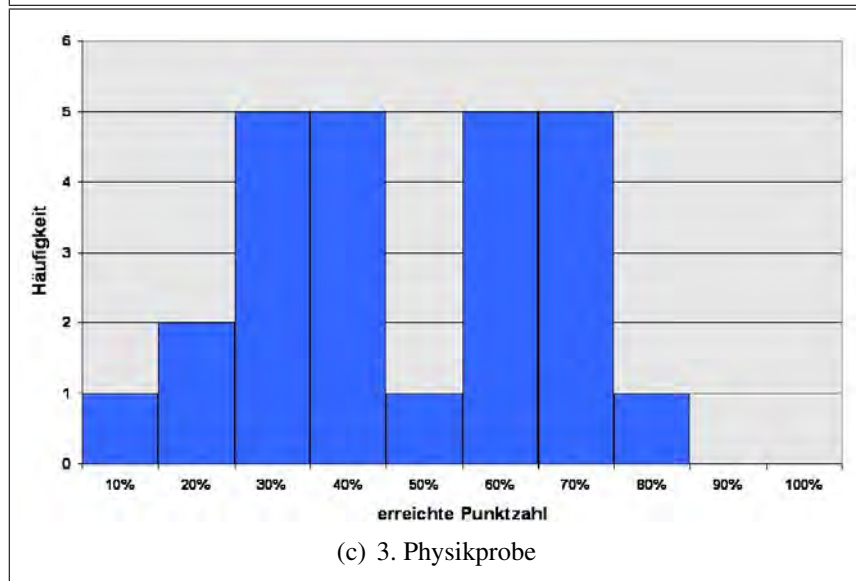
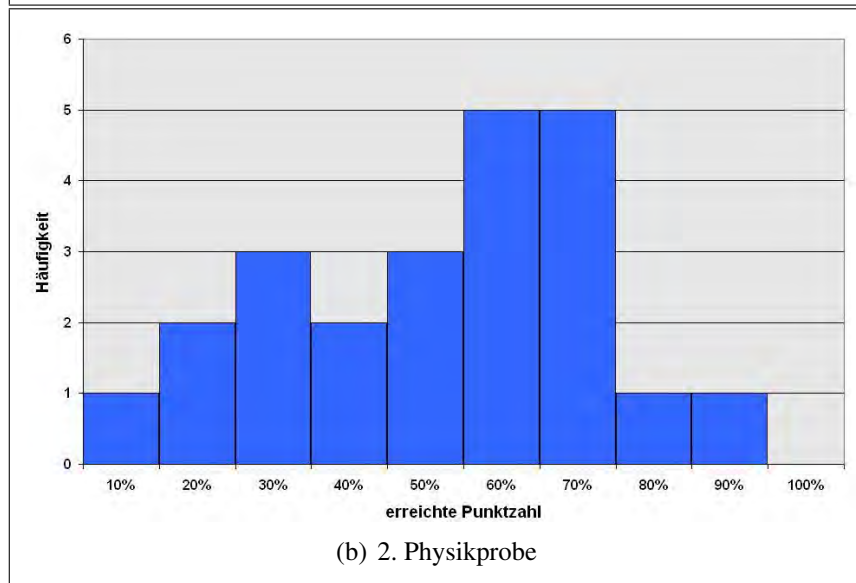
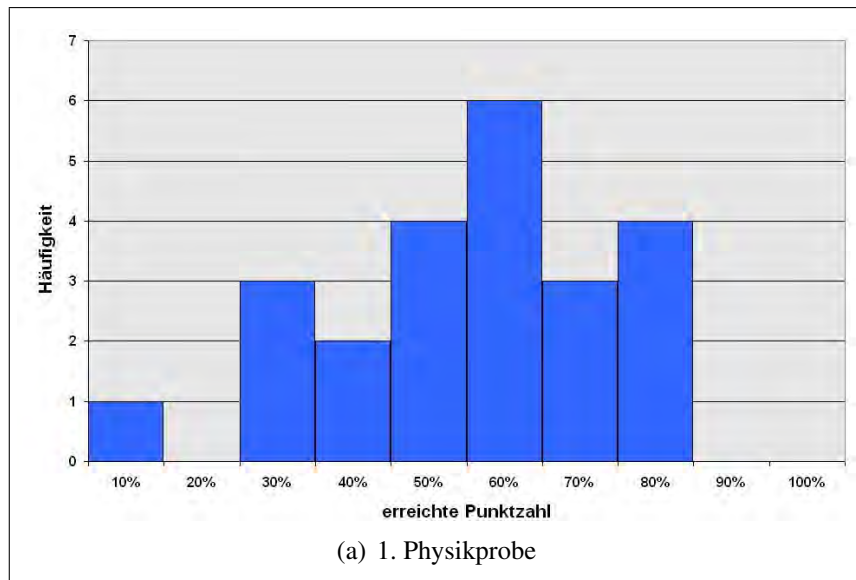


Abbildung 5.17: Häufigkeitsverteilungen der erzielten Punkte (in %)

## 6 Fazit der Hospitation

Nach einer vierwöchigen Hospitation an der Freien Waldorfschule Würzburg sollen in diesem Kapitel persönliche Erfahrungen reflektiert werden. Sie beschränken sich auf die besuchte Klasse, ebenso wie auf das Fach Physik. Um die eigenen Eindrücke zu bestätigen, aber auch um eine Rückmeldung zur selbstgestalteten Woche zu erhalten, wurde abschließend eine Meinungsumfrage in der Klasse durchgeführt.

### 6.1 Persönliche Eindrücke und Auffälligkeiten

Sowohl bei der Beobachtung als auch bei der eigenen Planung und Führung des Unterrichts an der Waldorfschule, waren viele unterrichts- und schülerspezifische Auffälligkeiten wahrzunehmen. An dieser Stelle muss betont werden, dass für Vergleiche zwischen staatlichem Unterricht und Waldorfschulunterricht persönliche, und damit nicht allgemeingültige Erfahrungen an staatlichen Gymnasien (eigene Schulzeit, Lehramtspraktika) herangezogen wurden. Einer der auffälligsten Unterschiede liegt in der Ruhe und Gelassenheit des Lehrers. Nicht ein einziges Mal wurde das Unterrichtsende zu einer Stresssituation, in der ein Versuch oder eine Rechnung unbedingt noch durchgeführt werden musste. Stattdessen ging der Lehrer auf alle Fragen der Schüler ein und verwies zur Interessensförderung auf zahlreiche Beispiele im Alltag, ohne auch nur einen Blick auf die Uhr zu werfen. Er nahm sich viel Zeit, um historische Entwicklungen und den zugehörigen gesellschaftlichen Hintergrund zu beschreiben. Undenkbar wäre es außerdem am Gymnasium, den Unterricht schon zehn Minuten vor offiziellem Schluss zu beenden. Hier würde versucht, auch diese Zeit noch mit lehrplangerechtem Inhalt auszufüllen. Ein möglicher Grund für diese größere zeitliche Freiheit an der Waldorfschule ist die Dauer des Hauptunterrichts je 100 Minuten. Sie erlaubt die Durchführung mehrerer thematisch ineinander übergreifender oder weiterführender Versuche, während am Anfang und Ende jeweils zweier 45-minütiger Einzelstunden mehr Zeitverluste auftreten würden. Durch den fehlenden Zeitdruck und die Offenheit der Lehrkraft wiederum, waren v.a. die männlichen Schüler ermutigt, nach Alltagserscheinungen oder einer wiederholten Erklärung zu fragen. Unterbrochen wurden Schüler aber dann, wenn sie versuchten, der Klasse ihre Beobachtung sofort nach Durchführung eines Versuches zu erklären. Obwohl auf diese Weise nur gewährleistet werden sollte, dass Mitschüler die Möglichkeit haben, selbst über das Ergebnis nachzudenken, schienen die Betroffenen durch diese Abweisung demotiviert. Positiv fiel der starke Einbezug der Schüler in die Versuchsdurchführungen auf. Auch wenn sich

oft nur kleine Aufgaben für einzelne Schüler finden ließen (Längenmessung, Tafelnotation von Messwerten, etc.), so wurde damit die Aufmerksamkeit aller Schüler auf das Unterrichtsgeschehen gelenkt. Das Experimentieren und Betrachten von Phänomenen an einfachen und alltäglichen Gegenständen, wie z.B. am handlichen Einfachspalt in Abschnitt 5.2 oder an der CD als Reflexionsgitter in Abschnitt 4.3.4, förderte ebenfalls die Involvierung der Schüler. Durch häufiges Zeichnen ihrer Beobachtungen wurden sie außerdem künstlerisch gefordert. Nach den Versuchsdurchführungen war besonders überraschend, wie schwer es manchmal tatsächlich schien, das Wahrgenommene in Worte zu fassen. Es machte den Eindruck, als würden die Beobachtungen erst nach einer verbalen Beschreibung wirklich registriert. An Staatsgymnasien wird erfahrungsgemäß davon ausgegangen, kürzlich gemachte Beobachtungen seien klar und müssten erst in Folgestunden zur „Auffrischung“ beschrieben werden. Besonders herausgestochen ist die häufige Betonung, dass es sich bei bekannten Theorien nur um Modelle handelt. Der Vergleich der Modelle untereinander regte die Schüler zur eigenen Argumentation und Urteilsbildung an. Neben diesen positiven Eindrücken gab es während der Epoche aber auch ernüchternde Momente. Wie bereits in den Unterrichtsbeschreibungen angedeutet (vgl. Kapitel 5), hatten viele Schüler Probleme bei mathematischen Umformungen, insbesondere beim Umgang mit Brüchen und deren Kehrwertbildung. Des Weiteren fiel auf, dass v.a. gegen Ende der Epoche Themenbereiche sehr unübersichtlich gekreuzt und überlappt wurden. Für mathematische Rechenübungen scheint dies sinnvoll, weniger aber bei Behandlung physikalischer Phänomene. So sollte der Epochenunterricht eigentlich eine zeitliche Verteilung einzelner Themen unterbinden, anstatt sie innerhalb aufzuweisen. Bei der Durchführung eigener Unterrichtsstunden fiel der Einbau eines Erzählteils trotz guter Vorbereitung von experimentellem und rechnerischem Teil schwer. Die Gewohnheit, den Unterricht durch mathematische Herleitungen oder Versuche voranzutreiben, anstatt gelegentlich nur minutenlang zu erzählen, ohne dabei Dialoge mit den Schülern einzubauen, konnte trotz Planung nicht abgelegt werden. Auch die spontane Einführung von Alltagsbeispielen fiel schwer.

Im Großen und Ganzen war die eigene Erfahrung an der Waldorfschule sehr positiv. Die Hilfsbereitschaft des Fachlehrers, eine freundliche Atmosphäre in der Klasse und deren Aufgeschlossenheit gegenüber studentischer Besucher, ermöglichten ein angenehmes Hospitieren und Unterrichten.

## 6.2 Meinungsumfrage in der Klasse

Die schriftliche Meinungsumfrage wurde in erster Linie aus persönlichem Interesse durchgeführt und sollte u.a. einer Rückmeldung zur eigenen Unterrichtsführung dienen. Da der Fragebogen sehr umfangreich ausfiel, werden im Folgenden nur einige relevante Ergebnisse angesprochen. An der Umfrage nahmen zehn Schüler und elf Schülerinnen teil. Sie konnten

verschiedenen Aussagen Zahlenwerte von 1 (trifft völlig zu) bis 5 (trifft überhaupt nicht zu) zuordnen (siehe Anhang 11.5). Der deutlichste Unterschied zwischen den Geschlechtern kam bei der Frage nach dem allgemeinen Interesse an Physik auf. So gaben sieben Schüler, aber nur zwei Schülerinnen an, sich für dieses Fach zu interessieren (Antworten 1&2). Daher ist es nicht verwunderlich, dass sich keine Schülerin eine berufliche Weiterbildung im Bereich Physik oder Technik vorstellen kann. Unter den männlichen Schülern konnten dies immerhin vier. Der Themenbereich Optik wurde im Vergleich zu anderen physikalischen Bereichen im Durchschnitt als uninteressant eingestuft. Nach eigenen Angaben war den meisten Schülern Huygens Wellentheorie zumindest teilweise bereits bekannt. Eine der größten Umstellungen bei der Selbstgestaltung des Unterrichts war das Offenlassen von Versuchsbeobachtungen bis zum Folgetag oder länger. Eben diese „Verarbeitungszeit“ wurde von lediglich drei Schülern als sinnvoll eingestuft. Dieses Ergebnis bestätigt auch die eigene Beobachtung von Neugier und Ungeduld im Unterrichtsverlauf (vgl. Abschnitt 6.1). Dagegen hielten fast alle Schüler den morgendlichen Unterrichtseinstieg über Geometrieaufgaben für geeignet. Allgemein machte die Klasse den Eindruck eines guten Zusammenhalts, der sich bei der Selbsteinschätzung der Schüler im Fragebogen bestätigte. Nach 12-jähriger, fast unveränderter Gemeinschaft war diese Beobachtung auch nicht verwunderlich. Dennoch gaben sechs Schüler und zwei Schülerinnen an, ein gewisses Konkurrenzdenken an den Tag zu legen. Beinahe alle Schüler benötigen laut Umfrage den Druck durch eine wöchentliche Physikprobe um den Unterrichtsinhalt zu wiederholen. Bis auf zwei Ausnahmen stufen sie diesen aber nicht als negativ ein. Obwohl beim selbstständigen Unterrichten nach eigener Einschätzung einige Unsicherheiten aufkamen, gaben fast alle Schüler bei der Umfrage an, eine Abweichung von der üblichen Unterrichtsführung kaum bemerkt zu haben. Bis auf eine Ausnahme, waren alle Schüler der Ansicht, der Unterrichtsstoff der selbstgestalteten Woche sei gut vermittelt worden und der Einsatz einer anderen Lehrkraft nicht störend gewesen.



## 7 Möglichkeiten der Lichtgeschwindigkeitsmessung - ein Projekttag

Licht und Lichtgeschwindigkeit sind zentral im Themengebiet Optik. Da jedoch zweiteres im Rahmen üblicher schulischer Möglichkeiten nicht zu Messen ist, wurden die Schüler zur Abrundung der Physikepoche einige Wochen später an die Universität Würzburg eingeladen. An drei Stationen konnten sie hier experimentell selbst die Lichtgeschwindigkeit mit Hilfe verschiedener Methoden ermitteln. Neben der klassischen Drehspiegelmethode Foucaults, lernten sie auch moderne Messverfahren mittels Oszilloskop kennen. Im Vorfeld erhielten sie außerdem im Rahmen einer Beamer-Präsentation (siehe Anhang 11.7) einen Einblick in die historische Entwicklung der Lichtgeschwindigkeitsmessung sowie in die Grundlagen der entsprechenden Messmethoden.

### 7.1 Grundlagen der Messmethoden und Durchführung

An den im Anschluss beschriebenen Stationen erhielten die Schüler Versuchsanleitungen (siehe Anhang 11.8), mit deren Hilfe eine relativ selbstständige Durchführung ermöglicht werden sollte. Außerdem wurde jeder Versuch von mindestens einer studentischen Fachkraft betreut, die bei offenen Fragen oder Problemen zur Seite stand.

#### 7.1.1 Messverfahren nach Foucault

An Station 1 erfolgt die Lichtgeschwindigkeitsmessung gemäß der von Leon Foucault im Jahre 1850 entwickelten Drehspiegelmethode. In Abbildung 7.1 ist ein skizzenhafter Versuchsaufbau zu sehen. Anstelle einer ursprünglich weißen Lichtquelle mit vorgeschalteter Linsenkonstruktion zur Bündelung des Strahls kann heutzutage ein Laser verwendet werden, in diesem Fall ein HeNe-Gaslaser der Firma Phywe (Artikelnr.: 08180.93, 0.1/2.0 mW). Dieser sendet rotes Licht aus, welches durch einen halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler) gelangt und an einem Drehspiegel so reflektiert wird, dass der Lichtstrahl auf einen etwa 15 Meter entfernten Planspiegel trifft. Zuvor wird der Strahl durch eine Sammellinse der Brennweite  $f \approx 5\text{m}$  gebündelt. Beim Rücklauf des Lichtstrahls befindet sich der Drehspiegel bereits in einer neuen Position, sodass der Strahl an einer anderen Stelle des Strahlteilers und unter einem anderen Winkel auftrifft. Diese Verschiebung kann bei genügend hoher Drehfrequenz und vorheriger Markierung an einem Schirm beobachtet und gemessen werden.

Die Drehfrequenz wird dabei durch Abgleich mit dem Klang einer Stimmgabel akustisch festgelegt. Für zwei verschiedene Töne,  $a^1$  (440 Hz) und  $c^2$  (528 Hz), wird aus den jeweils gemessenen Daten die Lichtgeschwindigkeit berechnet. In Abbildung 7.2 ist der Verlauf des Laserstrahls angedeutet. Durch den aufgeklebten Papierring auf der Linse, lässt sich dieser besser verfolgen und justieren.

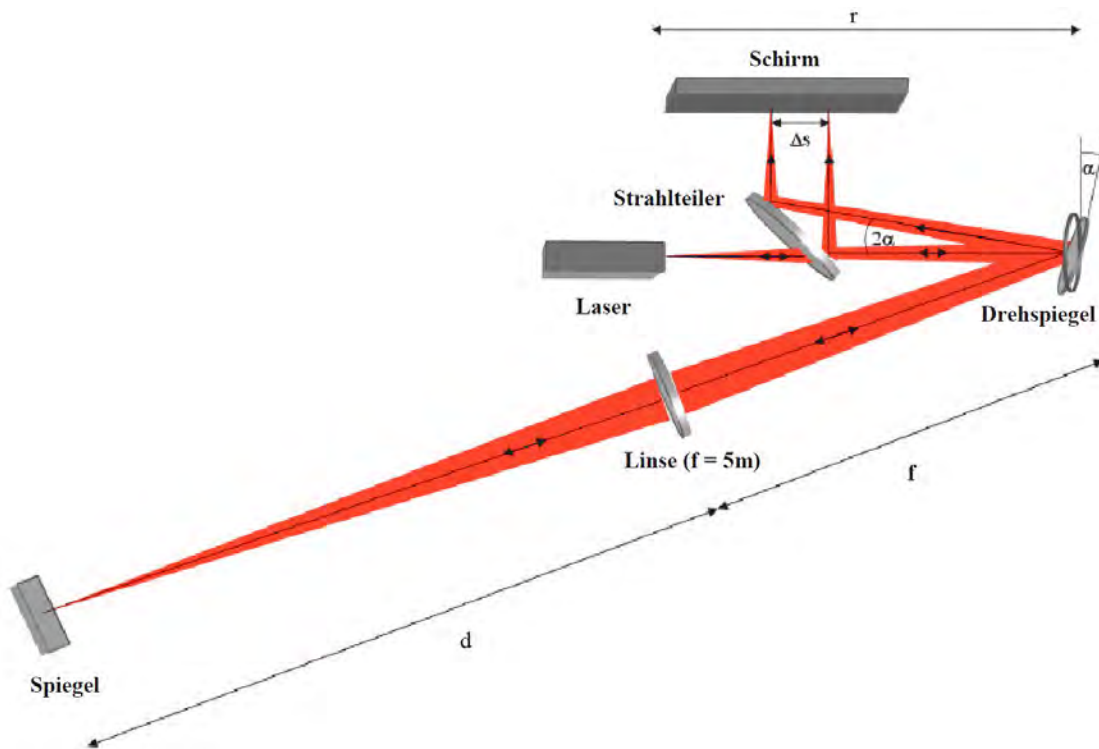


Abbildung 7.1: Prinzip der Drehspiegelmethode (Quelle: [Mol07])

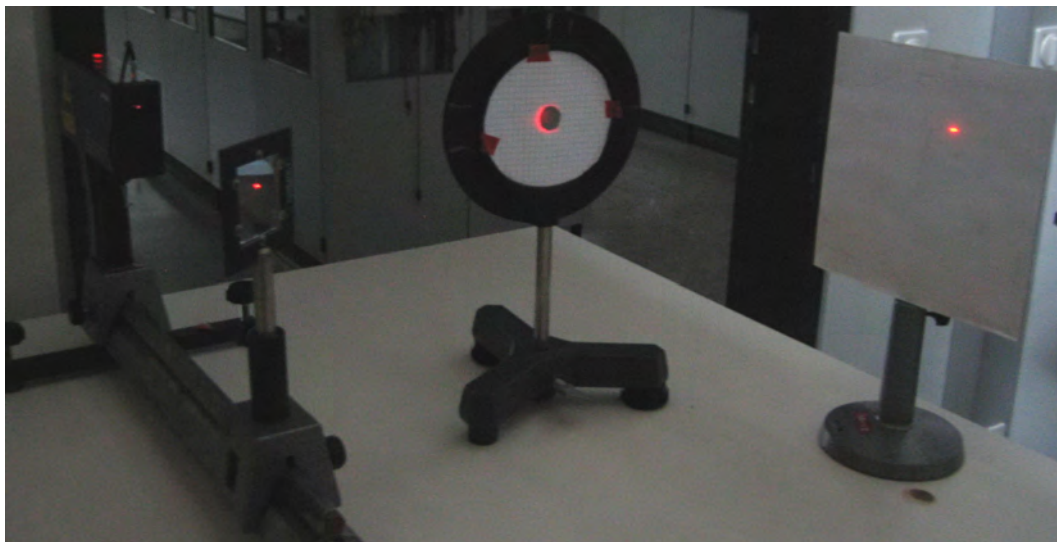
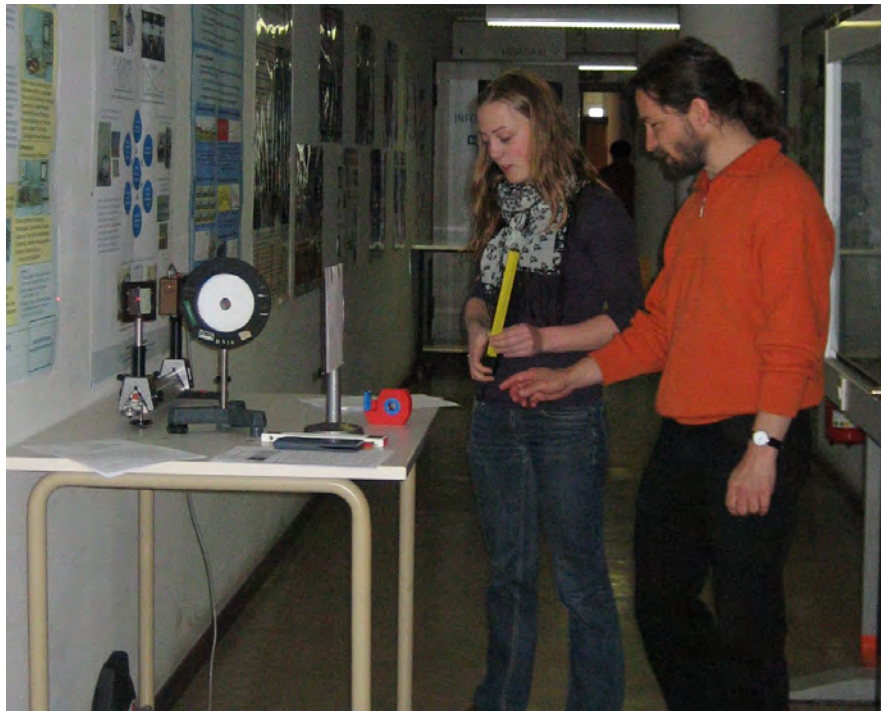


Abbildung 7.2: Roter Laserpunkt auf Strahlteiler, Linse und Schirm (von links)

Während in den Abbildungen 7.3 (a) und (b) die Schüler bzw. der Physiklehrer bei der Versuchsdurchführung zu sehen sind, zeigen die Abbildungen 7.4 (a) bis (c) die einzelnen Komponenten des Aufbaus.



(a) Messung benötigter Daten



(b) Akustischer Abgleich

Abbildung 7.3: Durchführung der Messung mittels Foucault-Methode



(a) HeNe-Laser mit Strahlteiler



(b) Drehspiegel und Stelltransformator



(c) Schirm, Strahlteiler, Sammellinse und Planspiegel (von links)

Abbildung 7.4: Komponenten des Versuchsaufbaus nach Foucault

### 7.1.2 Messung mittels Lissajous-Figuren

An Station 2 wenden die Schüler ein modernes Verfahren an. Unter Verwendung einer für Schulzwecke geeigneten Versuchsvorrichtung der Firma Phywe (Artikel-Nr. P0749700) und eines Zwei-Kanal-Oszilloskops von HAMEG (HM 205-3) lässt sich die Lichtgeschwindigkeit relativ genau ermitteln. Abbildung 7.5 zeigt den Versuchsaufbau ohne Oszilloskop.

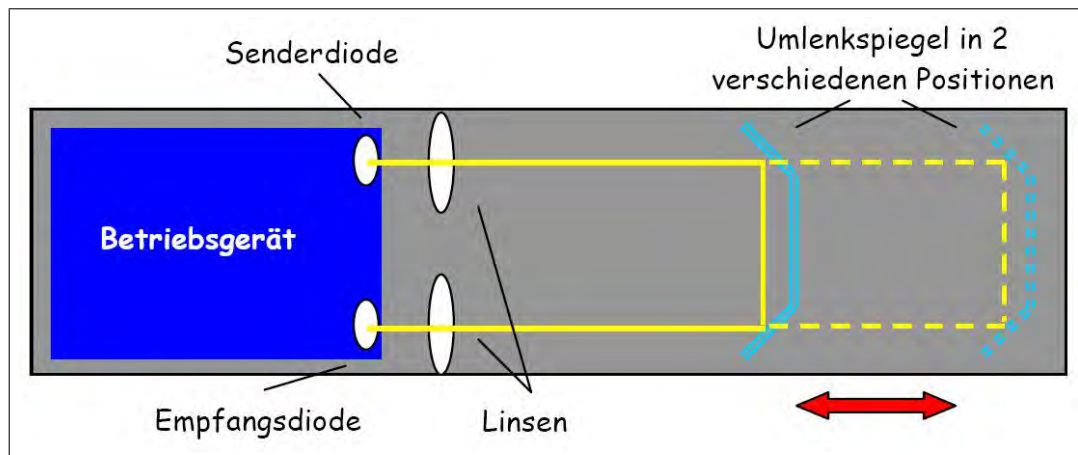


Abbildung 7.5: Aufbauskizze zur Versuchsvorrichtung (Quelle: [Mol07])

Eine mit Wechselspannung betriebene Senderdiode dient als Lichtquelle, wobei die Intensität mit einer festen Frequenz schwankt. Das ausgesandte Licht wird in einiger Entfernung von einem Umlenkspiegel zurückreflektiert und in einer Empfängerdiode wieder in Wechselspannung umgewandelt. Beide Dioden befinden sich dabei im Brennpunkt jeweils einer Sammellinse, welche den Lichtstrahl fokussiert. Werden nun die beiden Signale der Dioden in jeweils einen Kanal des Oszilloskops eingespeist, können im DUAL-Betrieb zwei gegeneinander verschobene Sinuskurven beobachtet werden (siehe Abbildung 7.6).

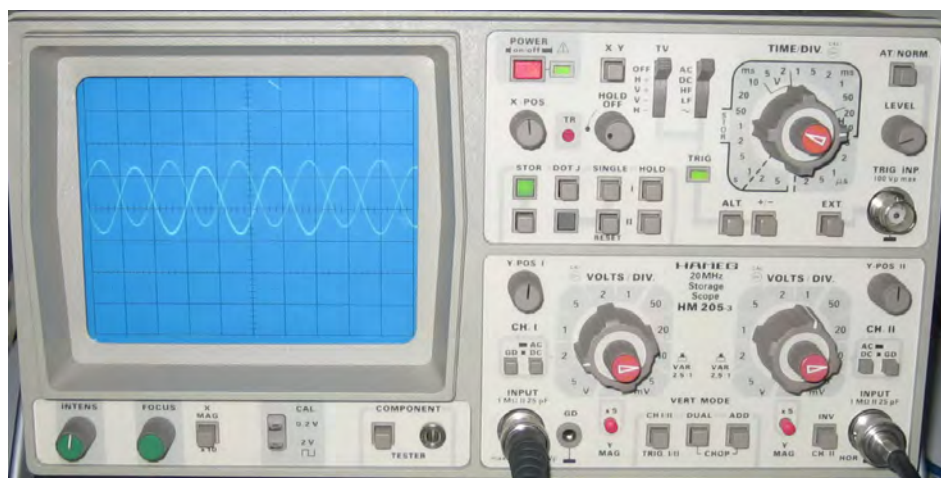


Abbildung 7.6: Phasenverschiebung zweier Sinus-Signale am Oszilloskop

Am Betriebsgerät ist diese Verschiebung auf Null zu regulieren, sodass im X-Y-Betrieb eine steigende Gerade am Leuchtschirm zu sehen ist. Diese sogenannte Lissajous-Figur verändert sich bei Verschiebung des Umlenkspiegels, da mit ihr auch eine Veränderung der Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$  verbunden ist. In Abbildung 7.7 sind die Lissajous-Figuren für verschiedene Phasenverschiebungen bei gleicher Amplitude und Frequenz beider Signale zu sehen.

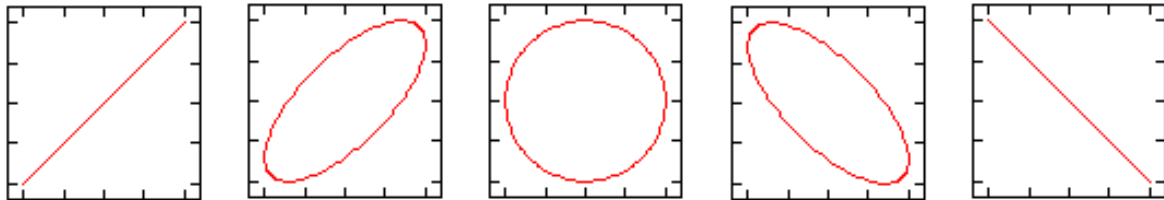


Abbildung 7.7: Lissajous-Figuren für Phasenverschiebungen von  $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3}{4}\pi, \pi$  (von links)  
(Quelle: [Lis09])

Der Umlenkspiegel wird nun genau so weit verschoben, bis  $\Delta\varphi = \pi$  erreicht und damit eine fallende Gerade am Leuchtschirm des Oszilloskops zu erkennen ist. Bei bekannter Periodendauer  $T$  der Wechselspannung kann mit der gemessenen Verschiebung  $\Delta s$  die Lichtgeschwindigkeit  $c$  berechnet werden gemäß

$$c = \frac{2\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\Delta s}{\frac{1}{2}T} = 4 \cdot \frac{\Delta s}{T}$$

Vor Einstellung des X-Y-Betriebs lesen die Schüler hierzu  $T$  direkt am Leuchtschirm ab, wobei dieser Wert, bedingt durch Umwandlung am Betriebsgerät, anschließend mit dem Faktor  $10^{-3}$  versehen werden muss. Das Betriebsgerät mit Linsen- und Umlenkspiegelvorrichtung (von links) ist in Abbildung 7.8 zu sehen. Die Abbildungen 7.9 und 7.10 zeigen Schüler und Betreuer bei der Durchführung des Versuches.



Abbildung 7.8: Versuchsvorrichtung der Firma Phywe

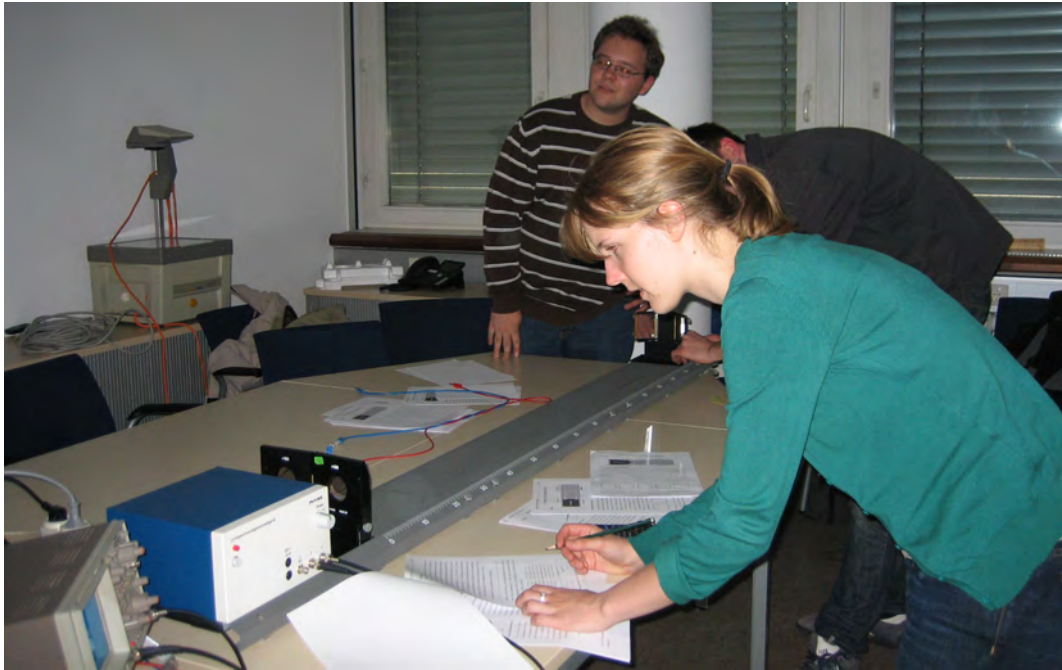


Abbildung 7.9: Schülerin bei Ermittlung der Periodendauer

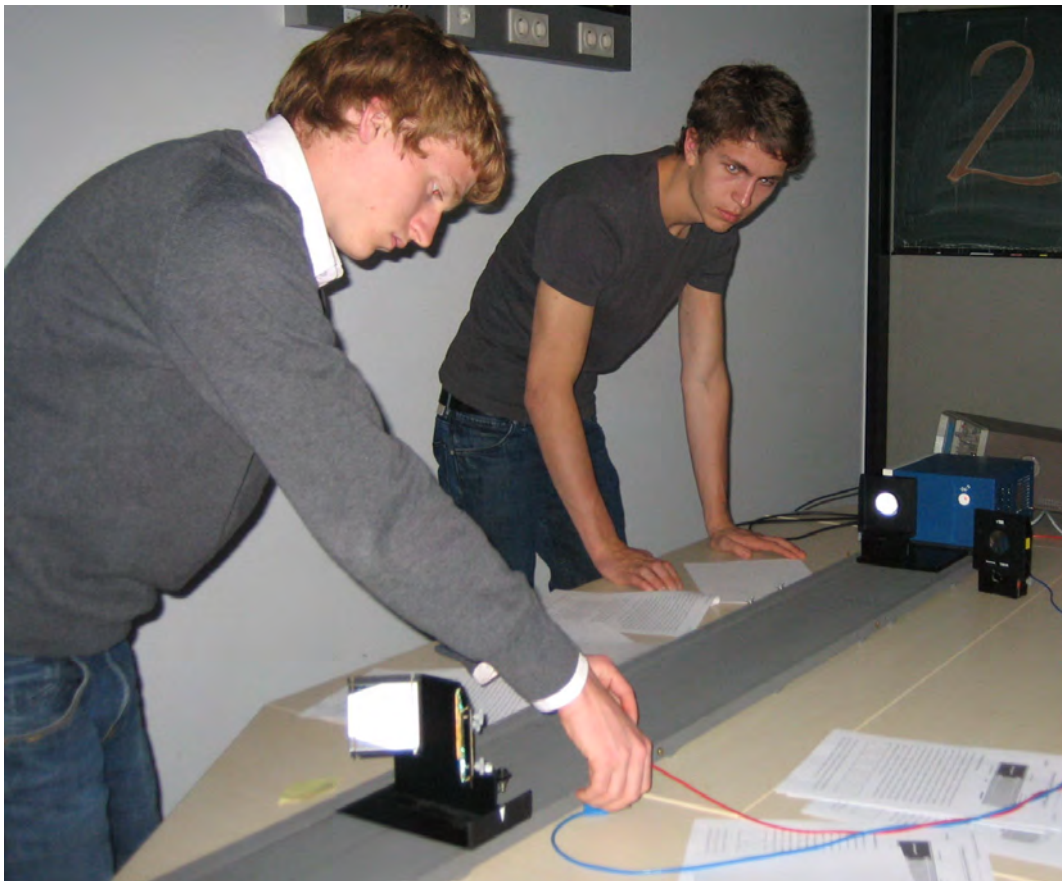


Abbildung 7.10: Schüler beim Justieren der Vorrichtung

### 7.1.3 Messung mit gepulstem Licht

Auch an Station 3 wird ein Oszilloskop zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit eingesetzt, hierbei jedoch ein digitales des Herstellers Tektronix (Serie TDS 2022B). Mit Hilfe einer festen Versuchsvorrichtung (LD Didactic AG & Co. KG, Versuch P5.6.2.1), wie sie in Abbildung 7.11 skizzenhaft dargestellt ist, kann direkt die Zeitdifferenz eines Lichtimpulses bei Zurücklegen einer bekannten Strecke gemessen bzw. am Leuchtschirm abgelesen werden.

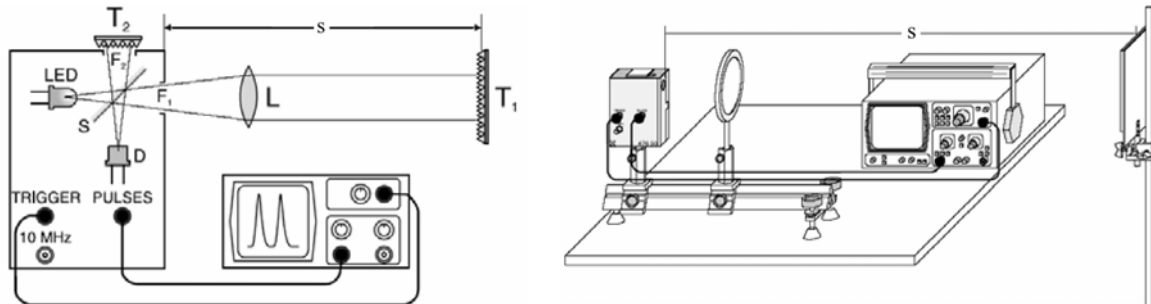


Abbildung 7.11: Versuchsaufbau zur Messung mit gepulstem Licht (Quelle: [Oss09])

Der von einer Leuchtdiode ausgesandte Lichtimpuls wird am Strahlteiler  $S$  in zwei Teilimpulse aufgeteilt, wobei einer zum Tripelspiegel  $T_1$  der andere zu  $T_2$  und wieder zurück läuft. Die Leuchtdiode steht dabei im Brennpunkt einer Sammellinse, welche das parallele Auftreffen der Lichtstrahlen auf den Tripelspiegel  $T_1$  sicherstellt. Der Strahlteiler und der Tripelspiegel  $T_2$  sind im Gehäuse der Messvorrichtung so angebracht, dass die Differenz der zurückgelegten Wege beider Teilsignale genau  $2s$  ist. Die Teilimpulse werden über die Diode  $D$  als Spannungspeaks an das Oszilloskop weitergegeben, sodass am Leuchtschirm ihre zeitliche Verschiebung  $\Delta t$  abgelesen werden kann (siehe Abbildung 7.12).

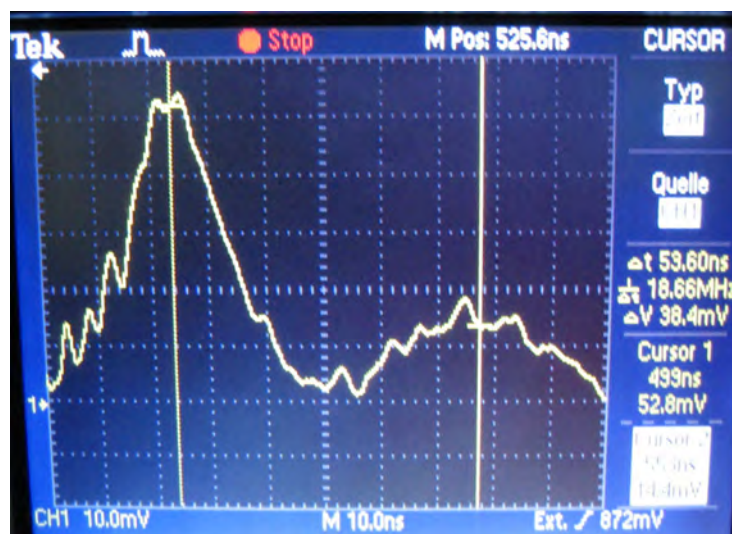


Abbildung 7.12: Spannungspeaks am Oszilloskop



Dabei werden die Cursor des digitalen Oszilloskops möglichst mittig am jeweiligen Peak positioniert. Die Schüler berechnen für zwei verschiedene Strecken  $s$  die Lichtgeschwindigkeit  $c$  gemäß

$$c = \frac{2s}{\Delta t}$$

## 7.2 Zusammenfassung und Eindrücke

Zum Projekttag an der Universität erschienen kurzfristig nur sechs Schüler und der Physiklehrer, sodass stets zwei Schüler pro Station eingeteilt waren. Die meiste Zeit nahm Station 2 in Anspruch, da hier jede Gruppe die Linsen und den Umlenkspiegel von neuem justieren musste, während an Station 1 die Feineinstellungen nach anfänglich grober Justierung recht zügig ablief und an Station 3 nahezu keine Justierung erforderlich war. Daher konnte diese übrige Zeit an Station 3 zusätzlich genutzt werden, um gemeinsam mit der studentischen Fachkraft weitere Funktionen und Eigenschaften des digitalen Oszilloskops kennenzulernen. Währenddessen wurde beim Vermessen von Foucaults Versuchsaufbau an Erkenntnisse aus der Physikepoche angeknüpft. Bekanntermaßen bildet eine Sammellinse genau dann im Verhältnis 1:1 ab, wenn die Gegenstandsweite dem Doppelten der Brennweite entspricht. Eben diese Eigenschaft wurde bei der geometrischen Anordnung zu Station 1 ausgenutzt, da der Laserstrahl wieder möglichst punktförmig auf dem Planspiegel abgebildet werden sollte. An diese Abbildungseigenschaft konnte sich einige Wochen nach der Physikepoche noch ein Teil der Schülerschaft erinnern. Nachdem alle Stationen durchlaufen waren, wurden die Ergebnisse gemeinsam verglichen. Als ungenaueste Methode erwies sich, wie zu erwarten war, die Drehspiegelmethode. Das lag größtenteils an der sehr ungenauen Messung der Leuchtpunktdifferenz trotz Millimeterpapier, aber auch am akustischen Abgleich, der subjektive Fehleinschätzungen in sich birgt. Dennoch erhielten die Schüler hier immerhin einen Wert von mindestens  $250000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Sehr viel genauer waren jedoch die Methode mit gepulstem Licht und die Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit mittels Lissajous-Figuren. Zweitere Methode lieferte den besten Wert von  $298000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Mit  $294000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  ist die Methode mit gepulstem Licht also kaum schlechter. Die Schüler selbst berichteten außerdem, ihnen habe die genaueste Methode am besten gefallen. Trotz zunächst relativ schwerer Theorie, welche hinter den Lissajous-Figuren steckt, sei diese letztenendes gut verständlich gewesen, während ihnen der Aufbau der Drehspiegelmethode und dessen Funktion unübersichtlich erschien. Das außerschulische Projekt dauerte von einführender Beamerpräsentation bis hin zur Nachbesprechung zweieinhalb Stunden und war damit in einem akzeptablen zeitlichen Rahmen durchführbar.

## **8 Waldorfpädagogik am staatlichen Gymnasium - kompatibel oder widersprüchlich?**

Die Hospitation an der Freien Waldorfschule ist eine interessante Erfahrung für jeden Lehrer oder Lehramtsstudenten, der selbst eine staatliche Schule besucht hat. Hinsichtlich seiner (künftigen) Aufgaben als Pädagoge, Fachexperte aber auch rechenschaftspflichtiger Staatsdiener stellt sich die Frage, inwieweit eine Übertragung von Elementen des Waldorfunterrichts in den eigenen bayerischen Staatsunterricht möglich und sinnvoll ist. Mit Sicherheit ist das Praktizieren der Waldorfpädagogik am staatlichen Gymnasium ein Widerspruch in sich. Man betrachte nur den Leistungsdruck, der allein durch Lehrpläne und Bildungsstandards ausgeübt wird. Hinzu kommen die speziellen anthroposophischen Grundannahmen, welche die Waldorfpädagogik ausmachen. Und doch lassen sich einige, bezüglich des bayerischen Staatsgymnasiums kompatible, waldorfpädagogische Elemente finden, welche im Folgenden insbesondere zum Themenbereich Optik erläutert werden sollen.

### **8.1 Optik in Bayerns G8-Lehrplan**

Um eine Aussage zur Übertragbarkeit waldorfpädagogischer Elemente machen zu können, muss zunächst geprüft werden, welche Inhalte für den Physikunterricht am bayerischen Gymnasium in den verschiedenen Jahrgangsstufen vorgesehen sind. Im Unterrichtsfach Natur und Technik der fünften bis siebten Jahrgangsstufe werden mitunter physikalische Phänomene behandelt und in erster Linie das naturwissenschaftliche Arbeiten gefördert. Die folgende Übersicht zeigt, wie sich der Themenbereich Optik in den Unterricht der betroffenen Jahrgangsstufen laut Lehrplan eingliedert (vgl. [Sta09]).

#### **Jahrgangsstufe 5**

Bereits im ersten Jahr am Gymnasium beschäftigen sich die Schüler im Natur- und Technikunterricht mit der Erscheinung Licht und seiner Aufspaltung in Farben. Auch Abbildungen mit Linsen sind Gegenstand des Unterrichts. Ganz allgemein sollen die Schüler mit Arbeitsmethoden vertraut gemacht werden, die in den Naturwissenschaften Anwendung finden.

#### **Jahrgangsstufe 7**

Natur und Technik als Fach besteht schwerpunktmäßig aus physikalischen Inhalten. Im Vordergrund steht der Einsatz der Fachsprache sowie der Umgang mit Modellvorstellungen.

Inhaltlich sind dabei die geradlinige Ausbreitung des Lichts und dabei entstehende Schatten zu behandeln. Die Schüler lernen die Entstehung reeller Bilder beim Spiegel oder der Sammellinse zu verstehen. Als drittes Thema der Optik werden die Farben und ihre Entstehung aus der Zerlegung weißen Lichts behandelt.

### **Jahrgangsstufe 9**

Die Optik als eigener Themenbereich ist in dieser Jahrgangsstufe nicht zu finden, jedoch spielen Atome im Unterrichtsinhalt eine große Rolle. In diesem Zusammenhang wird auch das Photonenmodell des Lichts behandelt, ebenso wie die optischen Emissionsspektren in Hinblick auf das Plancksche Wirkungsquantum und das Strahlungsgesetz. Daran knüpfen die Prozesse der Kernumwandlung an, womit verbunden die Äquivalenz von Masse und Energie eingeführt wird.

### **Jahrgangsstufe 10**

Die Schüler lernen den Wellen- und Teilchencharakter des Lichts kennen, sowie seine Art der Ausbreitung. Dazu werden zunächst verschiedene Formen von Wellen und ihre Interferenzerscheinungen behandelt. Die Beugung sowie die Interferenzerscheinung des Lichts am Doppelspalt und der Photoeffekt spiegeln den Welle-Teilchen-Dualismus wieder. Mit diesen Erkenntnissen wird den Schülern ein einführender Einblick in die Quantenmechanik gegeben.

### **Jahrgangsstufe 11**

Zentrale Themen dieser Jahrgangsstufe sind der Elektromagnetismus und die spezielle Relativitätstheorie. Nach Einführung elektromagnetischer Wellen, wird auch das Licht als solche eingestuft. Damit verbundene Phänomene (Reflexion, Beugung, Interferenz, Polarisation,...) werden behandelt. Auch die Grundaussagen und Folgen der speziellen Relativitätstheorie (Zeitdilatation, Längenkontraktion) sind Gegenstand des Unterrichts.

Als Lehrplanalternative kann in dieser Jahrgangsstufe auch das Fach Biophysik gewählt werden. In diesem Fall lernen die Schüler unter anderem das Prinzip optischer Täuschungen, sowie die Funktionsweisen von Auge und Ohr kennen. Hierunter fallen auch spezielle Inhalte, wie z.B. der Wellencharakter des Schalls und das menschliche Auflösungsvermögen.

### **Jahrgangsstufe 12**

Der Teilchencharakter von Photonen wird durch den Photoeffekt erneut dargestellt und mit Verweis auf Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz gedeutet. Umgekehrt lernen die Schüler auch den Wellencharakter von Elektronen kennen und vertiefen damit beginnend ihr Wissen um die Quantenphysik. Nach Einführung des quantenphysikalischen Atommodells, können entsprechende Anwendungen aus Wissenschaft und Technik im Unterricht erläutert werden.

## 8.2 Gemeinsamkeiten und übertragbare Elemente

Basierend auf den Vorgaben des bayerischen G8-Lehrplans lassen sich sehr viele inhaltliche Gemeinsamkeiten feststellen, auch wenn dabei einige Themen am staatlichen Gymnasium bereits vor der zwölften Jahrgangsstufen behandelt werden. Von verschiedenen Linsen und ihren Abbildungseigenschaften bis hin zum Photoeffekt sind die meisten Inhalte des kennengelernten Physikunterrichts an der Waldorfschule auch am Gymnasium eingeplant. Lediglich die Betrachtung von Goethes Farbenlehre (siehe Abschnitt 3.3) ist nicht vorgegeben und wird üblicherweise auch von keinem staatlichen Physiklehrer angesprochen. Dies mag v.a. daran liegen, dass Goethe Phänomene beschreibt, ohne theoretische Modelle zu errichten. Diese sollen aber laut Lehrplan bereits ab der siebten Jahrgangsstufe im Vordergrund stehen. Auch Newtons Korpuskeltheorie ist inhaltlich nicht eindeutig vorgesehen, wird aber häufig zumindest kurz im Gymnasialunterricht angeschnitten, da hierbei der Bezug zur Mechanik aufgegriffen werden kann. Denkbar wäre also, Goethes Betrachtungsweise, welche im naturwissenschaftlichen Gymnasialunterricht höchstens noch im Fach Natur und Technik vermittelt wird, im Zusammenhang mit dem Welle-Teilchen-Dualismus zu erwähnen. In der fünften oder siebten Jahrgangsstufe ließen sich zum Thema Licht und Farbe sicher auch etliche Schüler für das Phänomen des farbigen Schattens begeistern. Es besteht auch die Möglichkeit, dieses im Alternativfach Biophysik der elften Jahrgangsstufe aufzuzeigen. Allgemein sollte dem historischen Hintergrund von physikalischen Errungenschaften ein etwas höherer Stellenwert zugeschrieben werden. Ein Drittel der 45-minütigen Physikstunde mit einem Erzählteil zu füllen ist sicherlich weder möglich noch sinnvoll, aber gelegentlich könnte analog zur Waldorfschule ein Hinweis gegeben werden, unter welchen Bedingungen und zu welchem Zeitpunkt bedeutende Entwicklungen stattgefunden haben. Neben diesen inhaltlichen Elementen scheinen auch einige Aspekte der Unterrichtsgestaltung an Waldorfschulen sinnvoll und in gewissem Maße übertragbar. So fördert z.B. die Durchführung von Versuchen mit einfachen, handlichen Mitteln die Involvierung der Schüler in das Unterrichtsgeschehen. Dadurch wird ihnen ermöglicht, auch im Physikunterricht ab und zu ihre Sitzplätze zu verlassen um anschließend wieder etwas aufgeweckter dem Tafelanschrieb und der Theorie zu folgen. Zudem könnte der Lehrer mehr Wert auf eine detaillierte, verbale Beschreibung der Versuchsbeobachtungen durch die Schüler legen (vgl. Abschnitt 6.1). Auf diese Weise beschäftigen sich die Schüler nicht nur intensiver mit dem Gesehenen, sondern fördern gleichzeitig ihr Artikulationsvermögen. Die Struktur des Physikunterrichts ließe sich in sofern der Waldorfschule anpassen, dass Schüler die jeweilige Unterrichtsstunde mit einer neuen Beobachtung beenden, Experimente demnach erst in der Folgestunde geklärt werden. Dagegen finden im Gymnasialunterricht die meisten Versuche zu Beginn oder in der Mitte der Stunde statt. Auch auf Kommentare zur Versuchsdurchführung durch den Lehrer sollte dabei zur reinen Beobachtung verzichtet werden. Starten die Schüler mit einer Doppelstunde

Physik in den Tag, so haben sich kleine Einstiegsaufgaben zur Geometrie bzw. allgemeine Knobelaufgaben an dieser Stelle als geeignet erwiesen und könnte vom Physiklehrer auch am Gymnasium eingebaut werden. Unabhängig vom Fach Physik liegt es außerdem in der Freiheit des Lehrers, die Temperamente seiner Schüler bei einer festen Sitzordnung mitzubedenken (vgl. Abschnitt 2.2). Obwohl der Lehrplan die frühe Einführung von Modellen vorsieht und diese zur Beschreibung physikalischer Sachverhalte im Laufe der Jahre immer wichtiger und mathematischer werden, sollten die Schüler gelegentlich darauf verwiesen werden, dass Modelle nicht zwangsläufig der Realität entsprechen. Sie sind zur Vorstellung hilfreich, sollten die Faszination der Naturwissenschaft aber nicht völlig überdecken.

### 8.3 Probleme und Grenzen der Übertragbarkeit

Selbst die Übertragung soeben beschriebener Elemente aus Abschnitt 8.2 kann problematisch werden. Wird z.B. ein Experiment am Ende einer Stunde durchgeführt und von den Schülern beschrieben, so muss die Beobachtung in der Folgestunde ohnehin nochmals wiederholt werden, bevor eine Erklärung durch den Lehrer erfolgen kann. Dieser doppelte Zeitaufwand ist bei einer Unterrichtszeit von meist nur 45 Minuten auf Dauer nicht zu erbringen, v.a. da die Schüler meist noch einige Minuten verspätet im Physikraum eintreffen. Da Physik an der Waldorfschule als Hauptunterricht, und damit in den ersten beiden Stunden stattfindet, fällt diese Verzögerung dort aus. Auch regelmäßige, längere Erzählteile sind auf Grund des Zeitmangels durch den strengen Lehrplan kaum realisierbar. Die Struktur des Waldorfunterrichts ist daher in Einzelstunden nur beschränkt zu übernehmen. Ebenso wenig kann es sich ein Physiklehrer am bayerischen Gymnasium in einer Einzelstunde erlauben, seine Schüler Versuchsbeobachtungen gemächlich zeichnen zu lassen. Neben dem zeitlichen Problem spielt aber auch die Widersprüchlichkeit zum Lehrplan eine Rolle. So überdecken sich die meisten Themen zwar bzgl. ihrer einzelnen Inhalte, jedoch wird am staatlichen Gymnasium bereits sehr früh das Heranführen der Schüler an Modelle vorgeschrieben. Diese vorgezogene Intellektualisierung lässt sich mit der Waldorfpädagogik nicht vereinen. Inwiefern der Fachlehrer das Phänomen an sich und die Faszination in den Vordergrund stellen kann, ist daher vom Ausmaß der Rechtfertigungspflicht vor dem Schulleiter abhängig. Auch das *Lernen ohne Leistungsdruck* kann ein Lehrer nicht ermöglichen, denn er hat regelmäßig ausgefüllte Notentabellen vorzulegen. Hier stößt die Übertragbarkeit von waldorfpädagogischen Elementen an ihre Grenzen. Die entscheidenden Merkmale einer Waldorfschule (z.B. Epochenunterricht) liegen zur Einführung nicht im Einflussbereich einer einzelnen Lehrkraft.

## 9 Waldorfschule und PISA - ein Ausblick

Hinsichtlich der Übertragbarkeit waldorfpädagogischer Elemente in den staatlichen Unterricht, stellt sich auch die Frage nach der Legitimation eines solchen Transfers. Sie kann durch Rückmeldungen internationaler Schulleistungsuntersuchungen wie z.B. PISA erfolgen, an welchen sich die deutsche Bildungspolitik zunehmend orientiert. Obwohl das hierbei zentrale Leistungsprinzip in keinsten Weise Steiners Pädagogik entspricht und Waldorfschulen sich jahrzehntelang jeglicher Evaluation zu entziehen versuchten, bleibt deren Image von den Ergebnissen des „Programm for International Student Assessment“ nicht unberührt. Sie wirken sich ebenso auf aktuelle bildungspolitische Diskussionen aus, welche inzwischen Forderungen nach einem Gesamtschulsystem beinhalten. Daher soll im Folgenden ein Ausblick gegeben werden, der die Übertragung von lediglich einzelnen Unterrichtselementen im Fach Physik übersteigt.

### 9.1 Österreichische Waldorfschüler in PISA

Die Waldorfschule mit PISA-Studien in Zusammenhang zu setzen, scheint zunächst widersprüchlich, denn durch diese „[...] werden gerade die Fähigkeiten und Kompetenzen, die an den Waldorfschulen besonders gefördert werden - wie soziale Kompetenz, Kreativität, Selbständigkeit - nicht getestet“ [Bun06]. Umso überraschender ist daher das durchaus positive Ergebnis der separaten Auswertung österreichischer Waldorfschüler in den PISA-Tests der Jahre 2003 und 2006.

Am Beispiel der naturwissenschaftlichen Kompetenz sollen diese Ergebnisse im Folgenden aufgezeigt werden. Deren Beschreibung und Auswertung ist detailliert zu finden bei [Bun06] und [Bif09]. Da alle 27 Aufgaben aus PISA 2000 auch im Jahre 2003 verwendet wurden, sind die Ergebnisse von PISA 2003 an den vorherigen normiert, sodass längsschnittlich verglichen werden kann. Dabei liegt der von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) festgelegte Durchschnitt bei 500 Punkten. Während sich die naturwissenschaftliche Kompetenz der österreichischen Schüler im Vergleich zu PISA 2000 verschlechterte, verbesserten sich die Waldorfschüler durchschnittlich um 37 Punkte auf insgesamt 521, lagen damit also sowohl über dem Mittelwert der OECD als auch über dem von Österreich und Deutschland. Abbildung 9.1 liefert eine Übersicht der Mittelwerte (MW) aller 29 OECD-Mitgliedsstaaten sowie der deutschen Bundesländer aus PISA 2003.

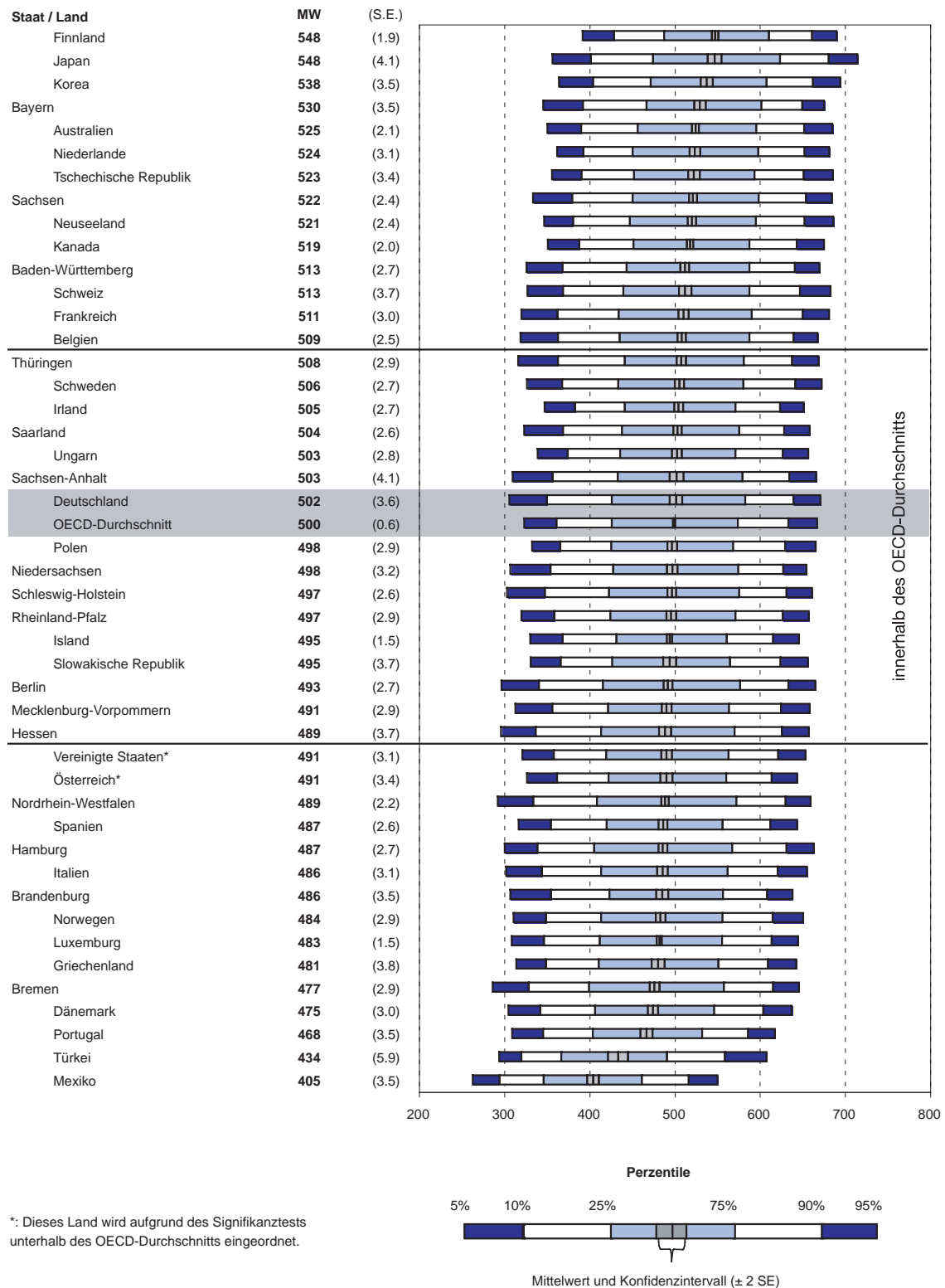


Abbildung 9.1: Ergebnisse zur naturwissenschaftlichen Kompetenz bei PISA 2003 (Quelle: [Pis09])

Als Schwerpunkt testete PISA erstmals im Jahre 2006 die naturwissenschaftliche Kompetenz, sodass die Leistungsverteilung nun auch im Querschnitt untersucht werden konnte. Die Freie Waldorfschule wurde dabei folgenden Schulsparten gegenübergestellt:

- Allgemeine Pflichtschulen (APS)
- Berufsschulen (BS)
- Berufsbildende Mittlere Schulen (BMS)
- Berufsbildende Höhere Schulen (BHS)
- Allgemeinbildende Höhere Schulen (AHS)

Auch hier lieferten die Waldorfschüler mit 524 Punkten ein überdurchschnittliches Ergebnis ab, das auch den Mittelwert Deutschlands von 516 Punkten übertrifft. Abbildung 9.2 zeigt die Leistungsverteilung der Kompetenzstufen nach Schulsparten.

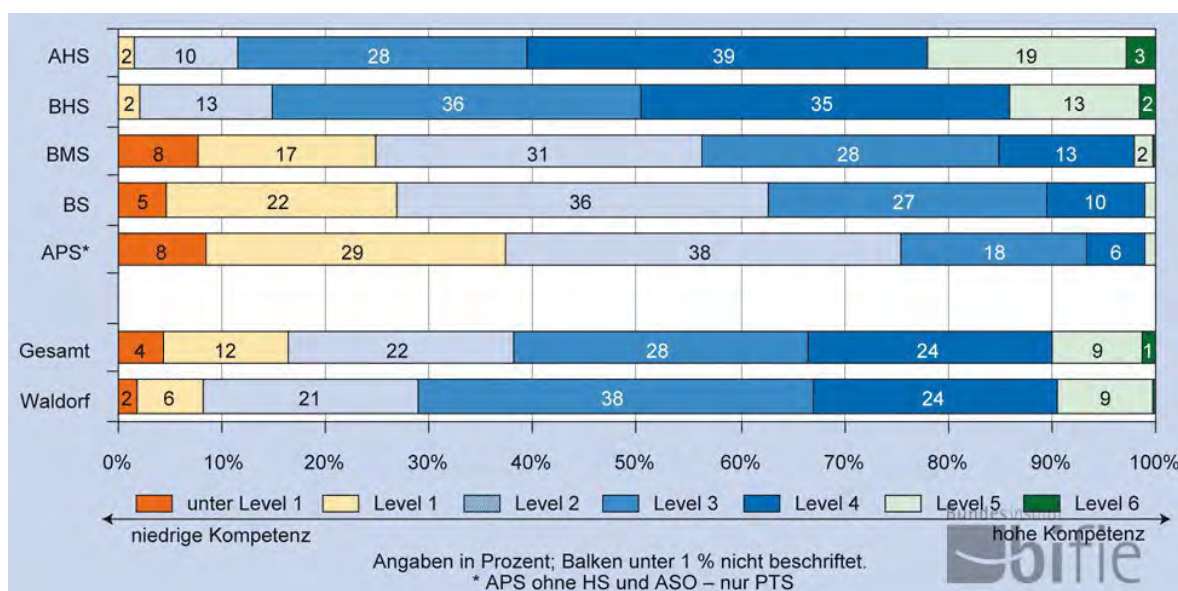


Abbildung 9.2: Kompetenzstufen in Naturwissenschaft bei PISA 2006 (Quelle: [Bif09])

Die Leistungen der Waldorfschüler liegen zu 71% im guten Mittelfeld (Level 3, Level 4 und Level 5). Leistungen im Level 6 sind zwar unter 1%, allerdings liegt die naturwissenschaftliche Kompetenz nur bei 8% der Schüler im Bereich von Level 1 oder darunter, während dieser Prozentsatz in der Gesamtbetrachtung doppelt so hoch ist.

Auch individuelle Kontextfaktoren haben Einfluss auf die naturwissenschaftliche Kompetenz der Schüler. Daher wurden in PISA 2006 neben fachlichen Wissensfragen auch Fragen zu den Bereichen „Allgemeines Interesse an Naturwissenschaft“, „Instrumentelle Motivation“ und „Freude an Naturwissenschaft“ gestellt. In all diesen machten die Waldorfschüler weitaus positivere Angaben als Schüler der anderen Schulsparten.



## 9.2 Das finnische Schulsystem

Auch ohne direkte Evaluation des Waldorfunterrichts werfen Vergleiche mit dem Gesamtschulsystem des PISA-Spitzenreiters Finnland (vgl. Abbildung 9.1) ein gutes Licht auf die Rudolf-Steiner-Schule. Denn unabhängig von den pädagogischen Elementen ist hier eine erstaunliche Ähnlichkeit beider Schulstrukturen und -organisationen zu erkennen.

Das Einschulungsalter in Finnland liegt bei sieben Jahren, wie es auch anthroposophisch begründet an der Freien Waldorfschule vorgesehen ist. In den darauffolgenden sieben Jahren, in Deutschland auf Grund der verfrühten Schulpflicht bis zur einschließlich 8. Klasse, wird der Klassenlehrer an der Waldorfschule beibehalten. In Finnland ist dies vergleichsweise bis zur einschließlich sechsten Klasse der Fall. Die Selektion schwächerer Schüler wird in beiden Schulformen vermieden, daher gibt es auch kein Sitzenbleiben. Die jeweils umfassende Schulbildung über 12 bis 13 Jahre, je nach Abschluss, fördert einen sehr guten sozialen Zusammenhalt in der Klasse. Fast analog zum Epochenunterricht der Waldorfschule wird das finnische Schuljahr in Perioden unterteilt, sodass schwerpunktmäßig nur wenige Hauptfächer parallel unterrichtet werden. In Finnland wird größtenteils in relativ kleinen Kursen von maximal 18 Schülern unterrichtet. Dies entspricht auch der maximalen Kursgröße in den Fachstunden und praktischen Fächern nach dem Hauptunterricht der Waldorfschule, da die Klasse hierfür aufgeteilt wird. Beide Schularten sind nicht staatlich, Lehrer daher keine Beamten. Deren Gehalt liegt zudem deutlich unter dem eines deutschen Staatsschullehrers (vgl. [Wen09] und [Kro09]).

Obwohl sie einen Ansatz für Erklärungsversuche bieten, können diese doch größtenteils oberflächlichen Analogien keinesfalls als einzige Ursache des relativ erfolgreichen Abschneidens von Waldorfschülern (vgl. Abschnitt 9.1) bzw. finnischen Schülern in PISA betrachtet werden. Daher sei abschließend darauf verwiesen, dass eine reine Kopie dieser Schulstruktur, ohne Berücksichtigung zahlreicher weiterer Einflussfaktoren, keineswegs einen plötzlichen Bildungsaufschwung in Deutschland garantiert.

## 10 Zusammenfassung

Die Freie Waldorfschule fällt in Deutschland unter den Begriff der sog. Alternativschulen. Stellt sich nur die Frage: Alternative wofür? Natürlich stellt sie in gewisser Weise eine Alternative zur staatlichen allgemeinbildenden Schule dar. Dennoch ist Schulgeld für Viele *keine* realisierbare Alternative zu dem vergleichsweise geringen Büchergeld, der Waldorfschulabschluss *keine* ernstzunehmende Alternative zur mittleren Reife oder dem Abitur. Denn dafür fehlt die Alternativgesellschaft. Und doch sind ihre Prinzipien offenbar so wertvoll, dass diese Schulform bereits auf eine 90-jährige Geschichte zurückblicken kann. Nicht ohne Grund besuchen allein in Bayern derzeit über 7000 Kinder und Jugendliche die Waldorfschule. Diesen Grund zu finden, war das persönliche Ziel dieser Arbeit, Ideen und Anregungen zur eigenen Unterrichtsgestaltung auch für andere (zukünftige) Lehrer zusammenzustellen war ein weiteres. So war der Besuch der Freien Waldorfschule Würzburg eine interessante Erfahrung, die viele neue Betrachtungsweisen eröffnete. Der enorme thematische Fortschritt, der innerhalb einer Epoche durchlaufen werden kann, vom Abmalen eines Stuhlschattens bis hin zur Grundaussage der Relativitätstheorie, war positiv überraschend. Ebenso erfreulich war die Hilfsbereitschaft der Schüler untereinander, obwohl diese unterschiedlicher fast nicht sein könnten. Auch wenn staatliche Schule und Waldorfschule z.T. konträre Ziele verfolgen, so haben sie doch Vieles gemein und können voneinander lernen. Denn letztendlich sollten alle Pädagogen Eines anstreben:

„Das Kind in Ehrfurcht aufnehmen,  
in Liebe erziehen,  
in Freiheit entlassen“<sup>3</sup>

*Rudolf Steiner*

---

<sup>3</sup>Dieser bekannte Leitsatz Steiners ist u.a. zu finden bei [Bun07]

# 11 Anhang

## 11.1 Wissensumfrage zur Optik

### Erinnerungen an die optische Physik

- Welche Anpassungserscheinungen des Auges sind bekannt?
- Welche Eigenschaften haben Schatten?
- Welche Phänomene können mit einer Lichtquelle und einem Schattenspender außerdem beobachtet werden?
- Welche Eigenschaften haben Spiegel und ihre Bilder?
- Welche optischen Eigenschaften hat Wasser? Phänomene?
- Was kann man beim Blick durch ein Prisma beobachten?
- Welche Linsenformen gibt es mit welchen Abbildungseigenschaften?

## 11.2 Unterrichtsprotokolle

**Dienstag, den 10. März 2009**

7<sup>50</sup> Uhr:

Nach Begrüßung und Vorstellung meinerseits beginnt der Unterricht wie gewohnt mit dem Morgenspruch Rudolf Steiners. Da das am vorausgegangenen Wochenende stattgefundene Klassenspiel „Am Ende war das Wort“ ein großes Projekt in der 12. Klasse darstellte, werden Eindrücke und Erfahrungen der Schüler zusammengefasst, wobei der Lehrer sein großes Interesse an der Entwicklung und Wirkung des Stücks deutlich macht. Am Ende des Gesprächs bitten die Schüler den Physiklehrer in der laufenden Epoche Rücksicht auf entsprechende Abschlussprüfungen zu nehmen und die Mathematik in der Physik nicht zu kurz kommen zu lassen.

**Lehrer-Schüler-Gespräch**

8<sup>03</sup> Uhr:

Als Einstieg in die Physikepoche bzw. den großen Themenbereich Optik greift der Lehrer die historische, religiöse und literarische bzw. umgangssprachliche Bedeutung des Lichts auf. V.a. in Sprichwörtern und Redewendungen wie „Mir geht ein Licht auf!“ oder „Ich sehe das Licht am Ende des Tunnels“ wird die erhellende und überaus positive Interpretation deutlich. Licht führt zu Erleuchtung. Gleichzeitig jedoch wird seine Besonderheit im Alltag nicht mehr wahrgenommen; der Mensch denkt über Gesehenes nicht mehr nach, da das menschliche Auge gekoppelt mit unserem Gehirn jegliche visuellen Informationen automatisch und damit mit sehr geringem oder keinem Bewusstsein verarbeitet. Hierin liegt auch die Ursache für sogenannte optische Täuschungen. Der Lehrer bringt hierfür einige z.T. bereits bekannte Beispiel vor (zwei gleich große Männchen im gezeichneten Raum, derjenige in der Ecke erscheint größer).

**Lehrer = Erzähler, hauptsächlich Frontalunterricht**

8<sup>17</sup> Uhr:

In der Klasse werden die bekannten Eigenschaften und Vorstellungen des Lichts zusammengefasst. Dabei fallen von Schülerseiten her Begriffe wie „spektrale Aufspaltung“, „Welle“, „Spektrum“, und Zahlenwerte für die Lichtgeschwindigkeit, wobei der Lehrer Letzteres an der Tafel festhält um v.a. die Umrechnung von  $\frac{m}{s}$  in  $\frac{km}{s}$  zu verdeutlichen.

**1. Versuch** Im abgedunkelten Klassenzimmer wird ein vom Beamer erzeugter Lichtstrahl durch ein etwa ebenso breites Loch in einen innen eingeschwärzten Karton geworfen. Der Lehrer hält gelegentlich seine Hand oder ein Blatt Papier in den Lichtstrahl. Die Schüler beobachten still und kommentarlos, wie diese Hindernisse aufleuchten. Werden

diese aus dem Lichtstrahl genommen, so ist dieser kaum zu sehen; das Zimmer ist vollkommen dunkel.

**2. Versuch** Ein Stuhl wird auf den Lehrertisch gestellt und mit einer Gelenklampe so beleuchtet, dass an der Wand hinter der Tafel der Stuhlschatten für alle Schüler zu sehen ist. Diese beobachten im Folgenden den Schatten in zwei verschiedenen Situationen.

- a) Das Fensterrollo des Klassenzimmers wird langsam heruntergefahren bis kein Tageslicht mehr in das Zimmer dringt. Der Schatten erscheint immer dunkler und schärfer, erhält also detailliertere Konturen.
- b) Die Intensität der beleuchtenden Lampe wird allmählich erhöht. Der Schatten scheint nochmals dunkler zu werden.

8<sup>40</sup> Uhr:

Die Schüler sollen nun ihre Beobachtungen und die bisherigen Versuchsaufbauten in das Epochenheft skizzieren und sich selbstständig Notizen machen.

**selbstständige S-Arbeit**

8<sup>49</sup> Uhr:

**3. Versuch** Anstatt mit der Schirmlampe wird der Stuhl nun im abgedunkelten Raum mit einer länglichen Leuchtstoffröhre beleuchtet. Je nachdem ob diese horizontal oder vertikal ausgerichtet ist erscheinen unterschiedliche Schattenbilder. Der Kernschatten wird zusammengepresst, das gesamte Schattenbild schwimmt entlang der Lampenausrichtung.

**4. Versuch** Eine schwarze Rolle wird senkrecht an der Tafel befestigt und mit der Leuchtstoffröhre beleuchtet.

- a) Zunächst beobachten die Schüler den Schattenwurf. Sie sollen den Kernschatten, Halbschatten und vermeintlich aufgehellten Bereich hinter dem Kernschatten erkennen und beschreiben, ohne jedoch zu deuten.
- b) Der Lehrer schiebt zwischen Leuchtstoffröhre und schwarzer Rolle ein Lineal ein und bewegt dieses auf und ab. Zu erkennen ist ein heller Strahl hinter der Rolle welcher entgegen der Linealbewegung läuft. Die Schüler scheinen über ihre Beobachtung erstaunt und zeichnen die Beobachtungen in ihr Epochenheft (etwa 5 min).

**selbstständiges Beobachten der S ohne L-Komentare**

9<sup>10</sup> Uhr:

Die Versuchsbeobachtungen werden gemeinsam in der Klasse in Worte gefasst, was sich

als nicht allzu leicht erweist. Auffällig ist v.a., dass Schüler z.T. völlig unterschiedliche Erinnerungen an Gesehenes wiedergeben. Eine Schülerin möchte ihre Beobachtungen sofort erklären, woraufhin der Lehrer sie auf den nächsten Tag vertröstet und teilweise auch unterbricht, um anderen Schülern die Möglichkeit zu geben über ihre eigenen Erfahrungen nachzudenken. Abgesehen von einer stichpunktartigen Zusammenfassung der Versuche an der Tafel, überlässt er eigene Notizen den Schülern.

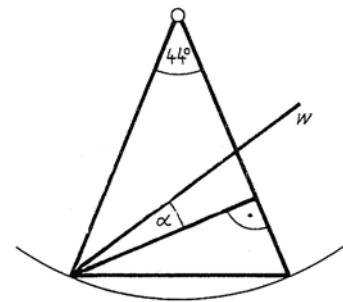
### Frontalunterricht mit Beiträgen der Schüler

9<sup>20</sup> Uhr: Zu Unterrichtsende verabschieden sich Lehrer und Schüler um die Stunde klar abzurunden.

### Mittwoch, den 11. März 2009

7<sup>50</sup>Uhr:

Anstelle des gewöhnlich angesetzten Rhythmisierungsteils, lösen die Schüler nach der Begrüßung im Gespräch eine Geometrieaufgabe. Gesucht ist in nebenstehendem Bild der Winkel  $\alpha$ . Der angedeutete Kreisbogen ist hierbei als Hilfestellung gedacht und soll auf die Gleichschenkllichkeit des Dreiecks verweisen, die mit „w“ beschriftete Linie ist Winkelhalbierende. Binnen weniger Minuten wird die Lösung  $\alpha = 12^\circ$  ermittelt.



8<sup>00</sup>Uhr:

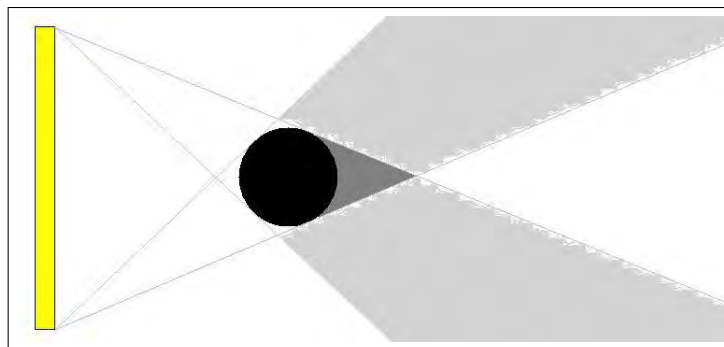
Die Beobachtungen vom Vortag werden im L-S-Gespräch reflektiert und die Erkenntnis aus den jeweiligen Versuchen von den Schülern frei schriftlich formuliert.

1. **Versuch** Licht selbst ist nicht sichtbar. Zu sehen sind nur angestrahlte oder selbstleuchtende Gegenstände.
2. **Versuch** Der Schatten ist lediglich als „Kontrastobjekt“ für das Auge sichtbar. Dieses kann keine absoluten Helligkeitswerte zuordnen sondern nur relativ vergleichen. Diese besondere Eigenschaft des Auges ist von Vorteil, denn dies ermöglicht das Wiedererkennen des abgestellten Autos in der Dämmerung, obwohl es bei Tageslicht das letzte mal gesehen wurde. Beim Herunterfahren des Rollos im Zimmer wird der Schatten tatsächlich dunkler, während er bei Erhöhung der Intensität der Gelenklampe seine Helligkeit nicht ändert. Lediglich die Umgebung wird heller, wodurch der Schatten relativ dunkler erscheint. Die drei Schattenstufen entstehen, da die Lichtquelle weder punktförmig noch sehr weit weg ist, womit die Lichtstrahlen nicht parallel einfallen. Der Lampenschirm streut das Licht, sodass verschieden helle Zonen entstehen.

Der Lehrer schlägt ein Gedankenexperiment vor: Die Schüler sollen geistig an der Leinwand entlanglaufen, mit dem Blick zur Lichtquelle hin. Licht breitet sich für gewöhnlich geradlinig aus, wodurch die Positionen der Stufen klar vorhersagbar sind. Ein Beispiel für nicht geradlinigen Verlauf gibt er mit dem Phänomen der Fatamorgana. Durch Krümmung der Luftschichten werden auch die Lichtstrahlen „gebogen“, wodurch ein weit entferntes Objekt sehr viel näher erscheint. An dieser Stelle zeigen die Schüler großes Interesse an der Klärung der Täuschung.

**3. Versuch** Durch die nun in die Länge gezogene Lichtquelle wird nur ein geringer Teil dieser durch den Stuhl abgedeckt. Besonders die Stuhlbeine sind so schmal, dass bei horizontaler Ausrichtung der Leuchtstoffröhre kein wirklicher schwarzer Kernschatten existiert, stattdessen nur eine leichter Grauton zu erkennen ist. Der Kernschatten der Stuhllehne ist ebenfalls sehr schmal und vertikal ausgerichtet. Bei vertikaler Ausrichtung der Lampe verhält es sich genau andersherum.

**4. Versuch** Die Konstruktion der Kern- und Halbschatten in Versuchsteil a), wie sie nachstehende Abbildung zeigt, ist den Schülern klar.



Interessanter dagegen ist der zu beobachtende helle Streifen im Schattenbereich, sobald ein Lineal zwischen Lichtquelle und schwarzer Rolle gehalten wird. Das Lineal verdunkelt den dahinterliegenden Halbschattenbereich der Rolle, sodass der gegenüberliegende Bereich vergleichsweise heller erscheint.

8<sup>51</sup>Uhr:

Es folgt eine kurze Pause, in welcher der Lehrer den folgenden Versuch vorbereitet und aufbaut.

8<sup>58</sup>Uhr:

Die Stufen des Stuhlschattens werden nun mit Hilfe eines an der Tafel montierten Lineals lokalisiert. Sie befinden sich bei 4 cm, 9 cm und 13 cm, wobei die Nullposition geeignet, aber beliebig gewählt wurde. Die Schüler werden nun aufgefordert, eine grobe Skizze über den Intensitätsabfall entlang des Lineals anzufertigen.

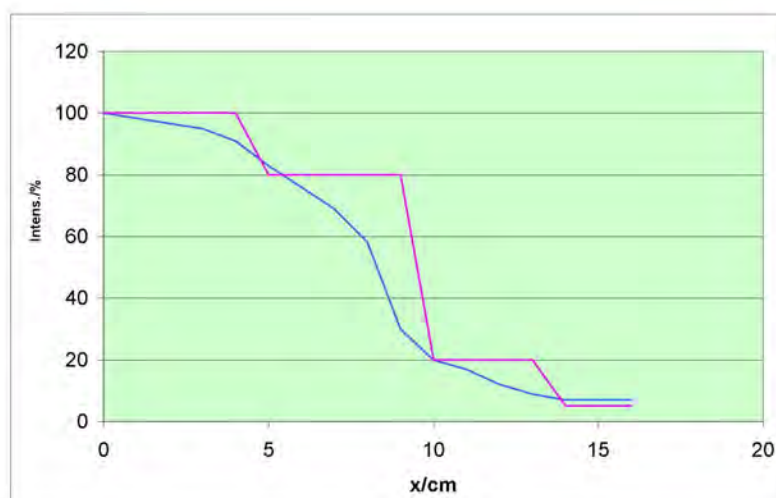
9<sup>13</sup>Uhr:

Schließlich wird der Intensitätsverlauf entlang des Lineals mittels Photodiode bestimmt. Dabei wird die Messvorrichtung so geeicht, dass bei maximaler Helligkeit ein Strom von 100 mA angezeigt wird. Von diesem Wert der 100 %-Intensität liest nun ein Schüler den prozentualen Intensitätsabfall ab, während ein weiterer die Daten schriftlich festhält. Es ergibt sich folgende Tabelle:

x in cm	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Intensität in %	100	95	91	83	76	69	58	30	20	17	12	9	7	7	7

9<sup>20</sup>Uhr:

Die Tabelle wird an die Tafel übertragen damit alle Schüler sie ins Epochenheft übertragen können. Die übrige Zeit des Hauptunterrichts wird dazu genutzt den tatsächlichen Intensitätsverlauf in parallel zum zunächst vermuteten einzuzeichnen. Dabei ergibt sich folgendes Bild:



Der rosa Verlauf entspricht dem von den Schülern zunächst vermuteten, der blaue dem gemessenen. Die Beobachtung selbst wird nicht diskutiert, sondern wie üblich vertagt.

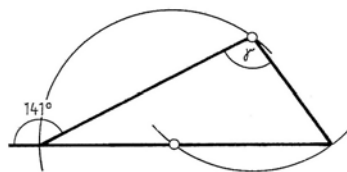
9<sup>30</sup>Uhr:

Ende des Hauptunterrichts und Verabschiedung



**Donnerstag, den 12. März 2009**7<sup>51</sup>Uhr:

Nach der Begrüßung und dem Morgenspruch wird als Einstieg wie des öfteren gemeinsam in der Klasse eine Geometrieaufgabe gelöst. Gesucht ist in nebenstehendem Bild der Winkel  $\gamma$ . Andeutungen der Kreisbögen helfen wiederum dabei, hilfreiche Details schneller zu erkennen. Die kleinen Ringe stellen dabei Mittelpunkte der Kreisbögen dar. Unter Verwendung der Eigenschaften der gleichschenkligen Dreiecke, die im Inneren des großen Dreiecks entstehen, ergibt sich  $\gamma = 63^\circ$ .

8<sup>02</sup>Uhr:

Der Lehrer knüpft durch mit der Interpretation des Graphen zum Intensitätsverlauf an den Unterricht vom Vortag an. Tatsächlich verändert sich an den Knickstellen nur die Steigung des Intensitätsverlaufs und nicht wie vermutet der Intensitätswert sprunghaft. Die Schüler weisen darauf hin, dass also eigentlich keine Stufen zu sehen sein dürften. Das Auge findet diese „Änderungen der Ableitung“ trotzdem, wie es auch in vielen anderen Fällen die Physik im Alltag verfälscht. Diese Verfälschungen (Kontrastverstärkung, Hervorheben von Konturen,...) ist jedoch eine durchaus positive Eigenschaft des Auges. Die Schüler halten fest in schriftlicher Notiz: „Auge nimmt Änderung der Helligkeitsverlaufs wahr“.

**L-S-Gespräch**8<sup>18</sup>Uhr:

- 1. Versuch** Der Lehrer befestigt große Bögen schwarzen und weißen Papieres an die Tafel und klebt jeweils ein oranges Stück Papier darauf. Er fragt die Schüler nach ihrer Beobachtung, da die weibliche Beteiligung aber gering ausfällt, spricht er einige Schülerinnen gezielt an. Die Klasse hält fest, dass die Orangetöne gleich sind. Der Lehrer vertauscht nun die beiden orangen Zettel und versetzt die Schüler damit in Staunen, denn die Orangetöne scheinen nun völlig verschieden. Der gleiche Versuch wird mit Grün-, Blau- und Grautönen wiederholt.
- 2. Versuch** Das orange rechteckige Papier wird wieder vor dem schwarzen Hintergrund befestigt, der weiße Bogen bleibt leer. Die Schüler sollen jetzt das orange Blatt anstarren und anschließend den Blick zum weißen Hintergrund lenken. Die Schüler sehen dort kurzzeitig ein blaues Rechteck.
- 3. Versuch** Der Lehrer teilt ein Schwarz-Weiß-Bild aus, das die Schüler anstarren sollen um dann den Blick auf die weiße Rückseite zu wenden. Als Erweiterung können sie den Abstand zum Gesicht verändern. Auf weißem Hintergrund erscheint eine Jesus-Figur die bei Entfernung des Papiers größer wird.

### hohe Schülerbeteiligung an Versuchen, ohne Unterbrechung oder Erklärung durch Lehrer

8<sup>36</sup>Uhr:

Die Beobachtungen werden wiederholt und zusammengefasst, während sich die Schülerschaft selbstständig Notizen macht. Je nach Einsatz der Kontrastwirkung des Auges wird zwischen Simultankontrast und Sukzessivkontrast unterschieden. Ist der Kontrasteffekt sofort sichtbar, spricht man von *Simultankontrast*, tritt er erst nach längerem Anstarren eines kontrastreichen Bildes und anschließendem Wechsel des Hintergrunds auf, ist also ein Nachbild zu sehen, so liegt ein *Sukzessivkontrast* vor. Das ist z.B. beim „Jesus-Bild“ der Fall. Dieses „Einbrennen“ auf der Netzhaut und Entstehen eines Nachbildes kennen die Schüler bereits von Blicken in die grelle Sonne, die kurzzeitig einen Fleck im Augenbild hinterlassen.

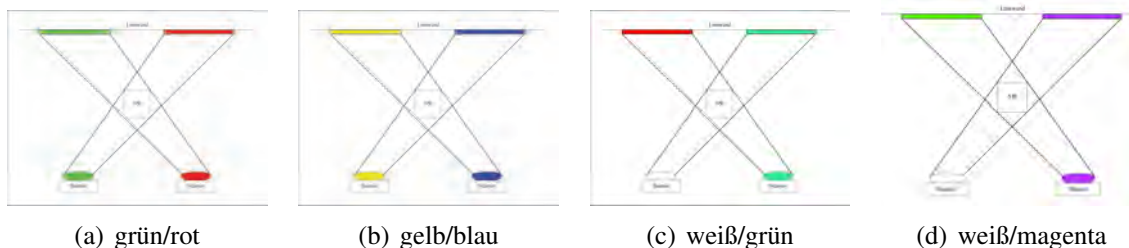
**4. Versuch** Die Schüler kleben ein kleines Stück Papier auf ihren Nasenrand und fixieren es mit einem Auge. Das Papierstück scheint nach einer Weile zu verschwinden. Die Erklärung erfolgt durch den Lehrer direkt im Anschluss: Es liegt ein Sukzessivkontrast vor. Durch das Anstarren und die steife Position des Kopfs ist das Auge beinahe schon „gelähmt“ und das Gesehene verschwindet.

### Lehrer-Schüler-Gespräch mit z.T. Frontalunterricht

8<sup>50</sup>Uhr: kurze Pause

8<sup>58</sup>Uhr:

Im hinteren Teil des Klassenzimmers sind zwei Beamer mit verschiedenen vorgesetzten Farbfolien aufgebaut, welche einen Schattenwerfer (SW) im vorderen Teil des Zimmers und die dahinterliegende Leinwand beleuchten.



9<sup>05</sup>Uhr:

Die Beobachtungen werden zusammengefasst und von einem Schüler mit Hilfe einer Skizze erklärt. Ein Schüler fotografiert den farbigen Schatten sogar erfolgreich. Der verblüffende Effekt aus c) und d) verschwindet beim Blick auf die zuvor farbige Fläche durch ein langes, dunkles Rohr - sie erscheint jetzt weiß. Es handelt sich beim farbigen Schatten also um einen Kontrasteffekt.

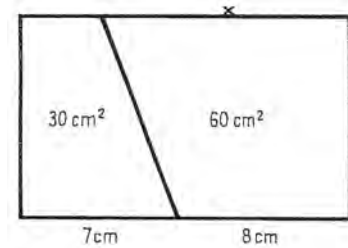
9<sup>21</sup>Uhr:

Ende des Hauptunterrichts und Verabschiedung

**Freitag, den 13. März 2009**

7<sup>53</sup> Uhr:

Wie gewöhnlich folgt nach dem Morgenspruch eine Geometrieaufgabe, welche diesmal von einem Schüler allein recht originell gelöst wird.



8<sup>05</sup> Uhr:

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der Konferenzbesprechung, die das Klassenspiel zum Inhalt hatte.

8<sup>17</sup> Uhr:

Das Sehen, die Phänomene des Auges sowie die Begriffe *Sukzessivkontrast* und *Simultankontrast* werden im L-S-Gespräch wiederholt. In diesem Zusammenhang, wird nochmals auf die Erklärung von Versuch 4b) vom 10. März eingegangen: hier handelt es sich um einen Simultankontrast, da der Effekt simultan, also gleichzeitig, ersichtlich ist. Anstatt einer zusätzlichen Verdunkelung im geometrischen Schatten des Lineals, nimmt das Auge eine Aufhellung im Bereich hinter dem Kernschatten der schwarzen Rolle wahr.

Die Schüler sollen anschließend ihre Beobachtung des farbigen Schattens wiedergeben und den Versuchsaufbau nochmals klären. Der farbige Schatten ist eine Folge des Weißabgleichs des Auges, wie es auch bei der Fotokamera der Fall ist. Das Interesse der Schüler an der Klärung einzelner Alltagsphänomene ist recht groß, und sie fragen nach dem grellen, farbigen Licht von Straßenlaternen. Hierbei handelt es sich jedoch tatsächlich um einfarbiges Licht, und nicht um einen Simultankontrast-Effekt. Die Schüler sollen schriftlich in ihren Epochenheften Folgendes festhalten: Der farbige Schatten ist kein Nachbild, sondern ist Folge des Simultankontrastes. Das Auge reagiert auf die grünliche Gesamtfläche/Gesamteindruck mit der Komplementärfarbe (rot). Der Lehrer geht weiterhin kurz auf die Frage nach der Funktion von 3D-Filmen und 3D-Brillen ein. Früher wurde noch über den Simultankontrast gearbeitet mit rot-grün Brillen, heute sind sie nur noch grau, dazu gibt er den Schülern jedoch vorerst keine Erklärung.

**L-S-Gespräch, S scheinen sehr interessiert**

8<sup>51</sup> Uhr: kurze Pause

8<sup>56</sup> Uhr:

Der Lehrer fasst zusammen, dass der Sukzessivkontrast ein bio-chemischer Prozess ist, der Zeit benötigt und damit ein längeres Hinsehen. Es gibt drei Farbrezeptoren (Stäbchen) im Auge, deren farbliche Aufnahmebereiche sich überlagern. Ist nach längerem Hinsehen das meist beanspruchte Stäbchen erschöpft, liefert ein anderes die Farbinformation weiter.

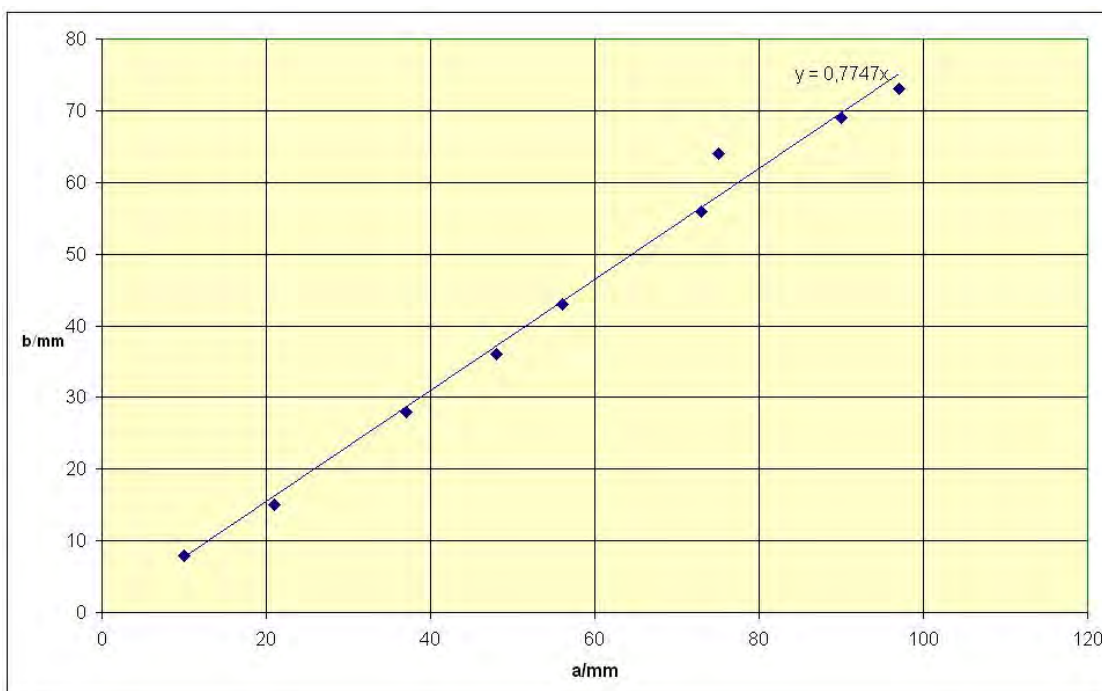
**Erzählteil, Monolog**

9<sup>04</sup> Uhr:

Der Unterricht wird mit einem neuen Versuch weitergeführt, bei dem Erscheinungen am Wasserbecken beobachtet werden. Zunächst wird ein Lineal schräg hineingehalten und seitlich betrachtet. Es scheint ab der Wasseroberfläche nach oben abzuknicken. Daher der Begriff „Brechung“. Die Erscheinung ist den Schülern noch aus der 6. Klasse bekannt. Im folgenden wird ein gebündelter Lichtstrahl schräg auf die Wasseroberfläche gelenkt. Vor einer abstandbeschrifteten Scheibe im Wasser ist er besonders gut sichtbar. Bei veränderlichem Abstand  $a$  des einfallenden Strahls zu der Mittelsenkrechten der Kreisscheibe, wird der Abstand  $b$  des geknickten Strahlteils zur selbigen gemessen. Dabei setzen die Lote gleichweit vom Scheibenmittelpunkt an. Der Lichtstrahl knickt diesmal, seitlich betrachtet, ab. Während der Lehrer die Werte an der Scheibe abliest, schreibt ein Schüler die Werte an die Tafel, wobei sich folgende Tabelle ergibt:

a in mm	10	21	37	48	56	73	75	90	97
b in mm	8	15	28	36	43	56	64	69	73

Die Schüler sollen die Werte nun selbstständig graphisch auftragen und anschließend, nach Eintragen einer mittleren Geraden, aus dem Steigungsdreieck den Quotienten  $\frac{\Delta b}{\Delta a}$  ermitteln. Es ergibt sich folgender Graph mit Ausgleichsgeraden:

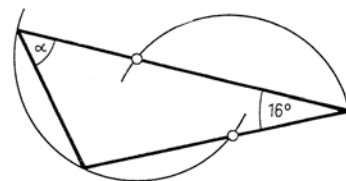


Für die ausgleichende Gerade ergibt sich ein Steigungswert von  $\frac{\Delta b}{\Delta a} = 0,77$ . Dieses grobe Ergebnis wird mündlich festgehalten und die Unterrichtsstunde beendet.

**Partnerarbeit, Schülerbeteiligung, Experiment**

**Montag, den 16. März 2009**7<sup>50</sup> Uhr:

Zum Einstieg soll in nebenstehender Skizze der Winkel  $\alpha$  ermittelt werden. Die markierten Punkte deuten dabei wieder Mittelpunkte von Konstruktionskreisen an. Zunächst schlagen einige Schüler den Einsatz von Kosinus oder Sinus vor, was vom Lehrer aber schnell verneint wird. Nachdem



diese Aufgabe etwas mehr Probleme zu machen scheint, fordert er sie auf, sich den Konstruktionsverlauf und die Reihenfolge zu überlegen. Zunächst wurde der 16°-Winkel gezeichnet, anschließend der Kreissektor rechts oben und danach der Kreissektor links unten konstruiert, mit jeweils gleichem Radius. Nun sind gleichschenklige Dreiecke im Gesamtdreieck zu erkennen, deren Eigenschaft ausgenutzt werden kann. Letztenendes ergibt sich  $\alpha = 66^\circ$ .

8<sup>04</sup> Uhr:

Der Lehrer wiederholt mit den Schülern die Beobachtungen am Wasserbecken. Die Schüler fassen zusammen:

Der Lichtstrahl knickt an der Wasseroberfläche seitlich betrachtet nach unten ab, wie es nebenstehende Abbildung zeigt. Das Lineal dagegen scheint seitlich betrachtet nach oben, also in Richtung der Wasseroberfläche abzuknicken. Der Lehrer fragt, welche Beobachtung man denn am Rande eines Schwimmbeckens machen kann. Die Fließen scheinen gestaucht und nach oben verschoben. Diesen Effekt kann man als *Hebung* bezeichnen. Auf die Frage, wieso Lineal und Licht in verschiedene Richtungen abknicken, bemerkt ein Schüler nach einigen Minuten, dass auch der Blick geknickt wird. Denn in der Stunde zuvor, war beim Blick entlang des Lichtstrahls, kein Knick sichtbar gewesen. Der Lehrer verweist darauf, dass in der Brechung auch die Besonderheit eines Fisch-Aufspießers am Amazonas läge. Für einen Laien ist das ein fast unmögliches Unterfangen, da der Fisch nicht dort ist, wo er zu sehen ist.

8<sup>15</sup> Uhr:

Das Messergebnis der vorhergehenden Stunde wird wiederholt. Für den konstanten Quotienten  $\frac{a}{b}$  ergab sich ein Wert von 1,33. Der Lehrer fragt nach der winkelabhängigen Gesetzmäßigkeit. Ein Schüler stellt fest, dass gedanklich zwei rechtwinklige Dreiecke an der Messscheibe vorhanden sind. Ist  $r$  der Radius der Scheibe, so ergibt sich:

$$\sin \alpha = \frac{a}{r} \quad \text{und} \quad \cos \beta = \frac{b}{r}$$

$$\Rightarrow \frac{a}{b} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 1,33$$

Der konstante Quotient wird als Brechungsindex  $n$  bezeichnet und gibt die Stärke der Brechung zwischen Luft und einem anderen Medium an:

$$\text{Wasser } n = 1,33$$

$$\text{Glas } n = 1,46 - 1,75$$

$$\text{Plexiglas } n = 1,49$$

$$\text{Diamant } n = 2,42$$

Ein Schüler fragt, was demnach beim Blick durch eine Fensterscheibe passiert. Schließlich müsste dann auch alles dahinter geknickt sein. Der Lehrer erklärt, dass beim Austritt des Lichtstrahls auf der anderen Seite der Scheibe, dieser wieder zurückgeknickt wird und dadurch letztendlich nur eine Parallelverschiebung des Bildes erfolgt. Sie ist aber auf Grund der sehr dünnen Scheibe nicht zu bemerken. Die Erklärung wird durch eine Skizze an der Tafel unterstützt.

8<sup>38</sup> Uhr:

Die Schüler berechnen selbstständig einige Minuten lang den Brechungswinkel  $\beta$  für Glas und einem Eintrittswinkel von  $44^\circ$ . Dabei haben Einige aber Probleme bei der Taschenrechnereinstellung. Die Schüler helfen sich hierbei gegenseitig. Das Ergebnis wird anschließend verglichen.

8<sup>50</sup> Uhr:

An der Tafel sind zwei Tonpapierbögen angebracht: einer weiß, der andere schwarz. Ein keilförmiger, mit Wasser gefüllter Behälter steht auf dem Pult. Die sog. ziehende Kante dieses Prismas zeigt nach links, und so scheint beim Blick hindurch alles nach links verschoben zu sein.

8<sup>56</sup> Uhr:

Jeder Schüler erhält nun ein handliches Glasprisma und soll mit der ziehenden Kante nach oben ein erweitertes schwarz-weiß-Muster (Schachbrett) an der Tafel betrachten. Die Beobachtungen werden in das Epochenheft skizziert, während der Lehrer durch die Bankreihen läuft.

9<sup>15</sup> Uhr:

Die Beobachtungen werden zusammengefasst. Es treten Farben an den Rändern des weißen Papiers auf. Rot scheint aus dem schwarzen Hintergrund hervorzutreten. Violett und Blau entstehen scheinbar auf dem schwarzen Papier.

9<sup>20</sup> Uhr:

Ende der Unterrichtsstunde

**Dienstag, den 17. März 2009**

7<sup>52</sup> Uhr:

Zu Beginn der Stunde verweist der Lehrer die Schüler darauf, dass diese Unterrichtsstunde bereits um 9.00 Uhr endet und er heute daher auf eine Geometrieaufgabe als Einstieg verzichtet. Es wird also direkt mit einer Wiederholung des Vortages begonnen, das Brechungsgesetz  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$  nochmal an die Tafel geschrieben. Eine zugehörige Skizze zeigt den Einfallswinkel und Brechungswinkel, sowie entsprechenden rechten Winkel. Allgemein gilt, dass der Lichtstrahl beim Eintritt von Luft in ein anderes Medium, zum Lot hin gebrochen wird. Liegt z.B. eine Münze in einem undurchsichtigen Becher und wird seitlich so betrachtet, dass sie gerade nicht mehr sichtbar ist, so kann sie durch Auffüllen des Bechers mit Wasser sichtbar gemacht werden. Eine Skizze verdeutlicht die Idee. Nun stellt der Lehrer die Frage, was passiert, wenn man aus dem Wasser an die Oberfläche sieht. Ab einem bestimmten Grenzwinkel spiegelt die Wasseroberfläche, d.h. es gibt einen Kreis, durch den man nach Außen sehen kann. Dieser Grenzwinkel kann bestimmt werden, indem man  $\alpha = 90^\circ$  setzt und damit den Brechungswinkel (bzw. den Einfallswinkel des Blickes) berechnet gemäß:

$$\begin{aligned}\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_G} &= 1,33 \\ \sin \beta_G &= \frac{1}{1,33} \\ \Rightarrow \beta_G &= 48,75\end{aligned}$$

Dieser Wert für den sog. *Grenzwinkel der Totalreflexion* gilt hier speziell nur für Wasser. Mit Hilfe einer Skizze sollen die Schüler nun für Plexiglas, Glas und Diamant drei weitere Grenzwinkel berechnen (ca. 3 min Zeit). Anschließend sollen sie den Öffnungswinkel des Kegels ermitteln, der bei Blick aus dem Wasser sichtbar ist. Er entspricht dem Doppelten von  $\beta_G$  und wird daher mit ungefähr  $100^\circ$  festgehalten. Der kleine Grenzwinkel beim Diamant verursacht die bekannte, hohe Reflexion beim Blick auf seine Kanten.

8<sup>19</sup> Uhr:

Die Schüler sollen sich nun an ihre Beobachtungen mit dem Prisma erinnern. Am schwarz-weiß-Muster wurden am Vortag Regenbogenfarben gesehen, jedoch ohne Grün. Zur Klärung der Entstehung dieser Übergangsfarben an den Kanten wird vom Lehrer die Frage nach dem Himmelblau und dem Abendrot aufgeworfen. Ein Schüler versucht diese Erscheinungen an der Tafel zu erläutern, jedoch falsch, und so wird die wellentheoretische Erklärung vom Lehrer nicht weitergeführt, da diese Deutung Vieles vorwegnehmen würde. Stattdessen erwähnt er weitere alltägliche Blauerscheinungen wie die Zwetschge, die nach dem Sauberreiben schwarz erscheint, der blaue Dunst in der Kneipe oder etwas Milch im Wasserglas. Bei einer Aufhellung von Trübem erscheint also die Farbe Blau. Blickt man dagegen direkt in

den Lichtstrahl, ist ein Rot zu sehen. Diese Beobachtungen hat schon Goethe ab 1790 als Urphänomene bezeichnet. Da beim Sonnenuntergang mehr Luftschichten zwischen Sonne und Betrachter liegen, wechselt ihre Farbe von Gelb zu Rot. Der Farbverlauf an den Kanten des schwarz-weiß-Musters wird zur Wiederholung an die Tafel gezeichnet. Da das Bild beim Blick durch das Prisma nach oben verschoben wird, zieht sich zum einen die weiße Farbe über das Schwarz (Entstehung von Blau und Lila), zum anderen aber auch das Schwarz über das Weiß (Entstehung der Farbe Rot).

**Erzählteil des Lehrers, Interesse der Schülerinnen hoch, viele Fragen aber wenig Beiträge**

8<sup>35</sup> Uhr:

Die Schüler schreiben selbstständig in ihren Epochenheften die Zusammenfassung von Goethes Urphänomenen mit.

8<sup>44</sup> Uhr:

Die Beobachtungen am Prisma werden bei einer Dia-Vorführung erweitert. Die Schüler betrachten nun auch andere schwarz-weiß-Muster an der Leinwand.

**Schüler scheinen interessiert, führen Versuch kommentarlos durch**

8<sup>51</sup> Uhr:

Die Beobachtungen am keilförmigen Muster werden an die Tafel gezeichnet. Im weißen Keil vor schwarzem Hintergrund laufen die Farblinien an der Spitze zu einem Grün zusammen, während an der Spitze des weißen Keiles die Farbe Magenta entsteht. Beide Farben sind also Überlagerungen der Farben Blau und Gelb, bzw. Violett und Rot.

8<sup>57</sup> Uhr:

Ende der Unterrichtsstunde

**Mittwoch, den 18. März 2009**

7<sup>57</sup> Uhr:

Das Dreieck  $d$  ist in ein Quadrat eingebettet, dessen Seitenmitte mit  $M$  bezeichnet ist. Die Quadrate  $A$  und  $B$  entstehen durch Viertelung des großen Quadrates.

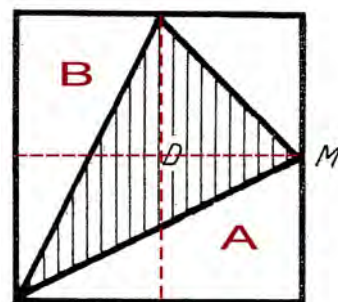
ges.: Verhältnis  $Q:D$

$$A = B \text{ und } A + B = \frac{Q}{2}$$

$$Q \setminus D = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} = \frac{5}{8}$$

$$\Rightarrow Q:D=8:3$$

8<sup>08</sup> Uhr:





Die Goethesche Farbenlehre vom Vortag wird wiederholt. Der Lehrer erzählt, dass Newton Goethes Interesse an diesen Erscheinungen weckte. Von Goethe ungeklärt bleiben das Auftreten der Farben Grün und Magenta. Während Goethe seine Anschauungen nur beschreibt, gründet Newton eine Theorie:

Newtons „Optics“ 1704

- weißes Licht enthält alle Farben
- Lichtstrahlen bestehen aus Teilchen
- Lichtteilchen sind verschieden schwer (violett am leichtesten, danach blau, grün, gelb, orange, rot am schwersten)
- Anziehung ist in alle Richtungen gleich, aber in verschiedenen Medien unterschiedlich stark (Glas stark, Luft schwach)

Newton ist in erster Linie aus der Mechanik bekannt, insbesondere aus der Lehre der Schwerkraft. Daher ist die Annahme von Lichtteilchen nicht verwunderlich. An der Grenzfläche unterschiedlich starker Medien werden sie in das stärkere hineingezogen und abgelenkt. Ein Schüler bemerkt, dass sich die Lichtgeschwindigkeit demnach im neuen Medium ändern müsste. Der Lehrer bestätigt dies, und zeichnet die Kräftewirkung auf ein Teilchen an die Tafel. Das unterschiedliche starke Abknicken verursacht die Aufteilung des Lichts in seine Farben. Sie führt auch beim Prisma zur Aufspaltung des Lichts. Hierzu wird eine Skizze angefertigt. Die Schüler fragen nach der Gültigkeit von Newtons Erklärung, da sie ihnen un schlüssig erscheint.

**Erzählteil des Lehrers**

8<sup>38</sup> Uhr:

An einem angezeichneten rechtwinkligen Dreieck wiederholt der Lehrer mit den Schülern die Beziehungen zwischen Sinus, Kosinus und Tangens.

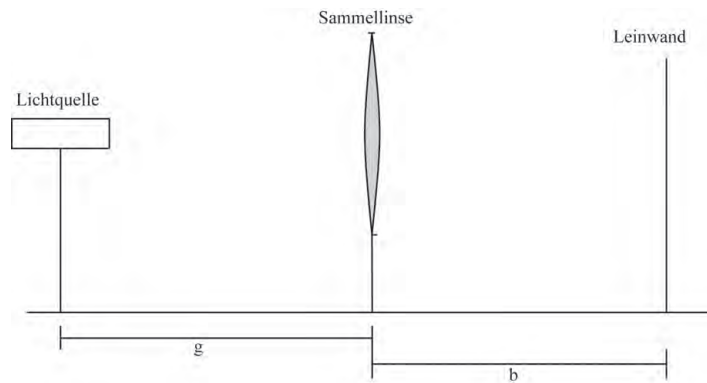
8<sup>44</sup> Uhr:

Eine weitere Tafelskizze zeigt den einfallenden Strahl auf eine Grenzfläche, seinen reflektierten Strahl sowie den gebrochenen Anteil. Der Lehrer stellt nun die Frage, für welchen Fall reflektierter Strahl und gebrochener Strahl senkrecht zueinander stehen. Die Schüler überlegen fünf Minuten lang bis sie einen weiter Tip erhalten. Mit Hilfe der vorher erarbeiteten Beziehung  $\tan \alpha = n$  erhalten sie für Wasser einen Einfallswinkel von  $53,06^\circ$ . Die Schüler stellen interessiert Fragen, z.B: wie der Zusammenhang durch  $\beta$  ausgedrückt werden kann. Die Antwort ist  $n = \frac{1}{\tan \beta}$ .

8<sup>58</sup> Uhr: kurze Pause, in welcher der Lehrer einen Versuch aufbaut

9<sup>06</sup> Uhr:

Im abgedunkelten Raum ist hinter einer Lampe ein schmaler Lichtstrahl zu sehen, der zentral auf eine vertikal ausgerichtete Sammellinse trifft. Zu verschiedenen Auftreffpunkten an der Linse wird die Ablenkung des austretenden Strahls betrachtet. Anschließend wird ein ausgeleuchtetes Dreieck über eine Sammellinse auf einer kleinen Leinwand abgebildet.



Zu verschiedenen Abständen  $g$  zwischen Lampe und Linse wird ein Abstand  $b$  der Linse zur Leinwand bestimmt, sodass das Dreieck möglichst scharf zu sehen ist. Außerdem wird die Größe des Bildes  $B$  notiert.

$g/\text{cm}$	70	50	40	30	25
$b/\text{cm}$	34	43	56	106	370
$B/\text{cm}$	1	1,7	3,1	7,5	31

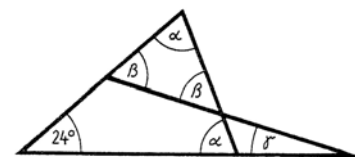
9<sup>21</sup> Uhr:

Organisatorisches bis 9<sup>30</sup>

**Donnerstag, den 19. März 2009**

7<sup>51</sup> Uhr:

Der Unterricht beginnt wieder mit einer Geometrieaufgabe. Die gesuchten Winkel sind schnell zu ermitteln. Offensichtlich ist  $\alpha = 78^\circ$ , daraus folgt  $\beta = 51^\circ$  und  $\gamma = 27^\circ$ .



7<sup>57</sup> Uhr:

Die Schüler fragen nach dem Inhalt der 1. Physikprobe, die am Folgetag stattfindet. Der Lehrer gibt die Themen vor und wiederholt sie mit den Schülern zusammen: Simultankontrast, Sukzessivkontrast, Verschiebung am Prisma,...

8<sup>13</sup> Uhr:

Newtons Teilchentheorie wird in der Klasse wiederholt. Der Lehrer verweist die Schüler

darauf, dass diese Theorie zwar nicht bewiesen, aber auch nicht direkt widerlegt werden kann. Ein Schüler bemerkt, dass sich die Lichtteilchen nach Newton im Auge ansammeln müssten. Die Schüler sind interessiert und stellen Fragen. Anschließend wird eine Skizze zur Linsenabbildung des Vortages an die Tafel gezeichnet. Dabei wird auch der Begriff „Brennpunkt“ geklärt, der in sofern zutrifft, da das Licht an einer Sammellinse auf einen Punkt gebündelt wird. So kann man bei Verwendung der Sonne als Lichtquelle an der Stelle des Brennpunktes ein Loch in ein Blatt Papier „brennen“. Kommen dagegen die Strahlen vom Brennpunkt, so verlaufen sie hinter der Linse parallel.

8<sup>41</sup> Uhr:

Der Lehrer zeichnet eine detaillierte Konstruktionsskizze zur Sammellinse an die Tafel. Die drei entscheidenden Strahlen sind Parallelstrahl, zentraler Strahl und Brennpunktstrahl. Auf die Frage nach Gesetzmäßigkeiten, erkennen die Schüler die Anwendungsmöglichkeit des Strahlensatzes. Daraus ergibt sich das Abbildungsverhältnis:

$$\frac{g}{b} = \frac{G}{B}$$

9<sup>00</sup> Uhr bis 9<sup>06</sup> Uhr: Pause

Wiederholte Anwendung des Strahlensatzes liefert die Herleitung der Linsengleichung:

$$\begin{aligned} \frac{f}{b} &= \frac{g}{g+b} && | \text{stürzen} \\ \Leftrightarrow \frac{b}{f} &= \frac{g+b}{g} \\ \Leftrightarrow \frac{b}{f} &= \frac{g}{g} + \frac{b}{g} && | : b \\ \Rightarrow \boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}} &&& \text{Linsengleichung} \end{aligned}$$

Dabei ist f die Brennweite, g die Gegenstandsweite und b die Bildweite.

9<sup>20</sup> Uhr:

Im nächsten Versuch, wird der Lichtstrahlverlauf bei einer Zerstreuungslinse betrachtet. Wie der Name schon sagt, laufen parallele Lichtbündel, die senkrecht zur Linsenachse auftreffen, hinter der Linse auseinander, und zwar so, als kämen sie vom lichtquellenseitigen Brennpunkt. Zielt der Lichtstrahl hingegen auf den Brennpunkt der anderen Seite, verläßt der die Linse parallel.

9<sup>24</sup> Uhr: Ende der Unterrichtsstunde

### Freitag, den 20. März 2009

7<sup>55</sup> Uhr: Vor Beginn der Physikprobe können die Schüler noch offene Fragen stellen. In erster Linie werden Formeln zur Grenzwinkelberechnung gefragt.

8<sup>05</sup> Uhr:

Die 1. Physikprobe beginnt, wobei etwa 45 Minuten für die Bearbeitung angesetzt sind.

8<sup>57</sup> Uhr:

Ende der Arbeit und kleine Pause

9<sup>04</sup> Uhr:

Die Linsengleichung vom Vortag wird wiederholt und die Tabelle vom 18.03 nochmal an die Tafel geschrieben. In einer zusätzlichen Zeile sollen die Schüler nun selbstständig die Brennweite  $f$  ergänzen. Hierzu verweist der Lehrer die Schüler auf die Taschenrechnerfunktion zur Kehrwertbildung. Viele Schüler haben Probleme bei der Berechnung, können mit Kehrwerten nicht umgehen. Durchschnittlich ergibt sich letztendlich eine Brennweite von 23,3 cm. Bei mehr Versuchsdurchführungen könne der Wert noch genauer bestimmt werden. Im L-S-Gespräch wird ermittelt, unter welchen Bedingungen man eine 1:1 Abbildung erhält. Unter Ausnutzung der Verhältnisgleichung gilt  $g = b$ , dies wiederum kann in die Linsengleichung gesetzt werden. Es ergibt sich die Bedingung  $g = 2f$ . Die Deutung ist, dass es zu jeder Linse mit Brennweite  $f$  ein  $g$  gibt, sodass die Abbildungseigenschaft erfüllt ist.

9<sup>23</sup> Uhr:

Als Abschlussversuch wird ein großer, planarer Spiegel aufrecht auf einen Tisch gestellt. Vor ihm befindet sich eine brennende Kerze und ein Schattenwerfer. Sowohl die originale Kerze, als auch die gespiegelte, verursachen einen Schatten. Dieser Versuch ist den Schülern schon aus früheren Epochen bekannt. Anschließend sollen sich die Schüler von ihren Plätzen aus gegenseitig im Spiegel betrachten und sich Gesetzmäßigkeiten zur Spiegelung überlegen. Zum Abschluss stellt der Lehrer die Frage, wie groß ein Spiegel sein muss, damit ein Mensch sich ganz darin sieht.

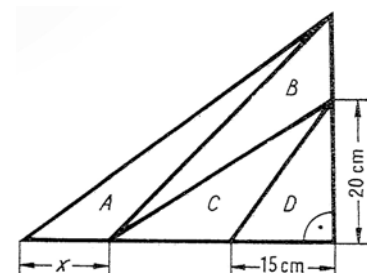
9<sup>29</sup> Uhr: Ende der Stunde

### Montag, den 30. März 2009

7<sup>59</sup> Uhr:

Nebenstehende Skizze zeigt die Geometrieaufgabe zum Einstieg. Gegeben ist:

$$A = B = C = D = 150\text{cm}^2$$



Der Lehrer hilft durch Hinweise auf die allgemeine Flächenformel für Dreiecke bei der Lösung weiter. Für die Gesamthöhe  $h$  des Dreieckes ergibt sich  $h = 30$ . Es folgt

$$\begin{aligned}A &= x \cdot \frac{1}{2} \cdot 30 \stackrel{!}{=} 150 \\150 &= 15 \cdot x \\ \Rightarrow x &= 10\end{aligned}$$

8<sup>08</sup> Uhr:

Der Lehrer wiederholt mit den Schülern die bekannten Lichtvorstellungen von Newton, Huygens und Goethe. Newton und Huygens versuchen die Realität mit Hilfe von Modellen zu erklären, während Goethe nur nach Gesetzmäßigkeiten in seinen Beobachtungen sucht. Hinter Newtons Modell steckt die Mechanik (Kräftelehre), beinhaltet also Stöße und Beschleunigungen. Die Schüler stellen gegenüber, was die Teilchentheorie bestätigt und was ihr widerspricht. Zwar kann die Beugung des Lichts noch durch Stöße der Teilchen an den Spaltkanten erklärt werden, die regelmäßige Anordnung der Farben beim Mehrfachspalt widerspricht aber völlig der Teilchentheorie. Im Lehrer-Schüler-Gespräch wird außerdem der Gleichgewichtsbegriff vertieft.

8<sup>22</sup> Uhr:

Der Lehrer wiederholt die Erklärung der Interferenzerscheinung nach Huygens. An einer Skizze erläutert er, wie die weiteren farbigen Streifen entstehen. Der Interferenzversuch würde mit zwei einfachen Glühbirnen aber nicht funktionieren. Entscheidend ist die Kohärenz des verwendeten Lichts. Daher erfordert der Versuch zum Einen eine Lichtquelle und zum Anderen einen sehr kleinen (Spalt-)Abstand der Teilstrahlen. Trotz kritischer Aspekte lebten die Menschen Hundert Jahre mit den Ansichten Newtons. Aber auch Huygens Wellentheorie wirft Zweifel auf. Denn alle bekannten Wellenarten benötigen irgendein Medium. Sie werden außerdem mit der Zeit abgeschwächt. Das Medium, welches Licht trägt, muss auch im Weltraum vorhanden sein, ebenso wie im evakuierten Glas. Trotzdem muss man sich darin bewegen können. Da die Geschwindigkeit aber sehr hoch ist, muss es gleichzeitig starr und hart sein. Die Reinheit des Mediums ist ebenfalls gefordert, da bei der Lichtausbreitung kaum Verluste auftreten. Wegen der hohen Frequenzen darf es keine hohe Masse haben. Euler berechnete einst, dass dieses gesuchte Medium eine Mio. mal starrer als Stahl, aber 100000 mal leichter als Luft sein müsste. Solch ein Stoff kann nicht existieren. An dieser Stelle kommt die Elektrizität ins Spiel. Aus der 11. Klasse ist den Schülern der Zusammenhang zwischen B- und E-Feld noch bekannt. Im Spule-Kondensator-Kreis können sie sich gegenseitig hervorrufen.

8<sup>48</sup> Uhr:

Es folgt ein zusammenfassender Tafelanschrieb:

*Elektromagnetische Wellen*

*Ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld.*

*Ein sich änderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Feld.*

*Bei hoher Schwingungsfrequenz lösen sich die elektrischen und magnetischen Felder von der Materie ab. Es entsteht eine elektromagnetische Welle.*

Auch ihr Spektrum wird als Überblick an die Tafel gezeichnet. Es reicht von den langwelligen Radiowellen und dem Infrarotbereich über den sichtbaren Bereich (rot, gelb, grün, blau, violett), bis hin zu dem kurzwelligen UV-Licht und der Röntgenstrahlung.

8<sup>54</sup> Uhr bis 8<sup>59</sup> Uhr kurze Pause

Der Lehrer greift den Inhalt der letzten Unterrichtsstunde auf. Die Wertetabelle zum Spektrum der Quecksilberdampfampe wird vervollständigt. Der Abstand der Lampe zur Tafel war  $l = 188,5\text{cm}$ .

Farbe	- UV -		violett	grün	orange
Abstand $a/\text{cm}$	39	44	48	61	66
Winkel $\alpha/^\circ$	11,7	13,3	14,3	19,0	19,2
Wellenlänge $\lambda/\text{nm}$	351	399	427	533	568

Das Linienspektrum wird grob an die Tafel skizziert. Die beiden UV-Linien sah man erst, als ein weiteres DIN A4 Blatt vor die Tafel gehalten wurde. Es enthält optische Aufheller, genauso wie Waschmittel. Daher leuchtet auch das weiße T-Shirt in der Disco. Die Berechnung des Winkels  $\alpha$  wird wiederholt. Es gilt  $\tan \alpha = \frac{a}{l}$  und  $\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}$ . Mit einem Laser wurde die Gitterkonstante des feinsten Gitters, das bisher mit  $600/\text{mm}$  angenommen wurde, neu berechnet. Dabei ergab sich  $\frac{1}{d} = 577/\text{mm}$ . Die Schüler haben immer noch Probleme mit der Umrechnung in Nanometer.

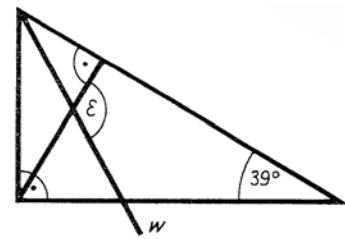
9<sup>20</sup> Uhr:

Die Schüler sollen eine CD als Reflexionsgitter benutzen. Der Lehrer erklärt den Versuch: Er stellt sich mit dem Rücken zu einer hellen Leuchtstoffröhre und betrachtet die farbigen Reflexionen an der CD-Oberfläche. Der Abstand Auge-CD und der Abstand zwischen abgebildetem weißen Streifen und grüner Linie soll zusammen mit dem Banknachbarn ausgemessen werden. Der Versuch wird aber nicht mehr vollständig durchgeführt.

**Dienstag, den 31. März 2009**

7<sup>56</sup> Uhr:

Als Einstieg soll die Klasse den Winkel  $\varepsilon$  bestimmen. Dabei bezeichnet  $w$  in dem Dreieck die Winkelhalbierende des oberen Winkels. Dieser beträgt  $51^\circ$  und so ergibt sich  $\varepsilon = 115,5^\circ$ .



8<sup>00</sup> Uhr:

Das Spektrum der Quecksilberdampfampe wird erneut angesprochen. Es stellt sich die Frage, wieso hier nur diskrete Linien auftreten. Der Lehrer verweist auf die Chemie, denn sie kann diese Linien zum Nachweis bestimmter Substanzen benutzen. Es treten z.B. beim Natrium zwei gelbe Doppellinien auf mit 589 nm und 590 nm. Außerdem verweist der Lehrer auf die Nutzung eines Handspektroskops.

**Erzählteil**

8<sup>08</sup> Uhr:

Die Schüler wiederholen den CD-Versuch vom Vortag, diesmal mit der Deckenlampe als Lichtquelle. Die Schüler stellen an der CD einen fließenderen Übergang der Farben fest, als es bei der Leuchtstoffröhre der Fall war. Am Vortag konnten die Linien besser getrennt werden. Der Lehrer vermerkt, dass Leuchtstofflampen im Vergleich zur Glühlampe ein unnatürliches Linienspektrum aufweisen. In Kaufhäusern z.B. stechen bestimmte Farben heraus. In Schultoiletten erscheint das eigene Gesicht meist sehr rot und allgemein dunkler.

8<sup>25</sup> Uhr:

Die Schüler blicken durch Handspektroskope auf verschiedene Lichtquellen.

**Versuchsteil**

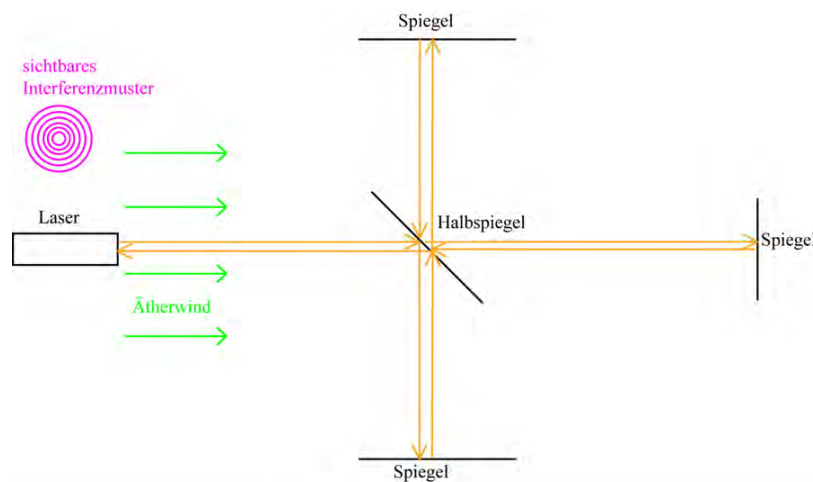
8<sup>30</sup> Uhr:

Der Versuch vom Vortag soll wiederholt werden. Die Spurbreite einer CD soll bestimmt werden. Dabei ist die Wellenlänge der grünen Farbe aus vorherigen Beobachtungen bekannt (550nm). Alle benötigten Gleichungen werden nochmal an die Tafel geschrieben. Für zwei verschiedene Datensätze der Schüler wird die Spurbreite berechnet ( $1,18\mu m$  und  $1,43\mu m$ ). Der wahre Wert liegt bei  $1,6\mu m$ . Die Fehlerquellen der Berechnung werden in der Klasse besprochen. Zum Einen können grobe Messfehler auftreten, zum Anderen ist die Bedingung des  $90^\circ$ -Winkels zwischen Auge und CD nicht gegeben, da der eigene Kopf sonst die Lichtquelle verdecken würde. Die Gleichungen sind daher nur Näherungen.

8<sup>55</sup> Uhr bis 9<sup>00</sup> Uhr: Pause

Die Kritik am Wellenmodell wird vom Lehrer aufgegriffen. Das angenommene Medium

des Lichts, der Äther, existiert überall, auch im Weltraum. Es kann nicht angenommen werden, dass der Äther sich zusammen mit der Erde dreht, daher muss sich die Erde in ihm drehen (Ätherwind). Diese Bewegung einer Wellenquelle, z.B. Schallwellen beim fahrenden Auto, hat aber einen Einfluss auf deren Verhalten. Der Versuch von Michelson und Morley widerlegt die Existenz eines Äthers.



Man erhält bei diesem Interferometer ein Interferenzmuster. Falls es einen Äther gibt, muss eine Art „Gegenwind“ messbar sein. Der Lehrer erklärt, dass es sehr schwer ist diesen Versuch nachzubauen, da in der normalen Schulumgebung immer kleine Erschütterungen auftreten, das Muster sich also ständig verändern würde oder gar nicht erst sichtbar wäre. Es wird schriftlich festgehalten:

*Wenn es einen Ätherwind gäbe, müsste sich das Interferenzmuster mit der Ausrichtung der Aparatur verändern. Es bleibt aber immer gleich.*

9<sup>15</sup> Uhr:

Trotzdem gibt es noch ein weiteres Experiment, das für die Wellentheorie spricht. Über eine Sammellinse wird das Licht eines Diaprojektors auf eine Leinwand projiziert. Dazwischen werden zwei Polarisationsfolien positioniert, die gegeneinander verdreht werden können. Stehen deren Durchlassrichtungen senkrecht zueinander, ist eine Verdunkelung an der Leinwand zu sehen. Maximale Helligkeit erhält man bei gleich eingestellter Durchlassrichtung. Bringt man eine weitere Folie vor die Projektorlinse und stellt senkrecht zu deren Durchlassrichtung die drehbare Polarisationsfolie davor, erscheint die Leinwand wieder dunkel. Stellt man dazwischen die zweite drehbare Folie im 45° Winkel zu beiden Positionen, so wird das Bild wieder aufgehellt. Der Lehrer hält ein Plexiglas in das Licht des Projektors. Drückt er dieses zusammen, so treten an manchen Stellen Verdunkelungen auf. Hält er Folien in den Lichtstrahl, so sind fabrige Verläufe auf der Leinwand zu beobachten.

9<sup>25</sup> Uhr: Ende

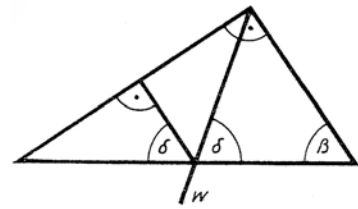


**Mittwoch, den 1. April 2009**

7<sup>55</sup> Uhr:

Zum Einstieg ermitteln die Schüler die Winkel  $\delta$  und  $\beta$  im Dreieck.  $w$  ist wieder die Winkelhalbierende. Es ist

$$\Delta = \frac{180^\circ - 45^\circ}{2} = 67,5^\circ$$



Damit ergibt sich für  $\beta$

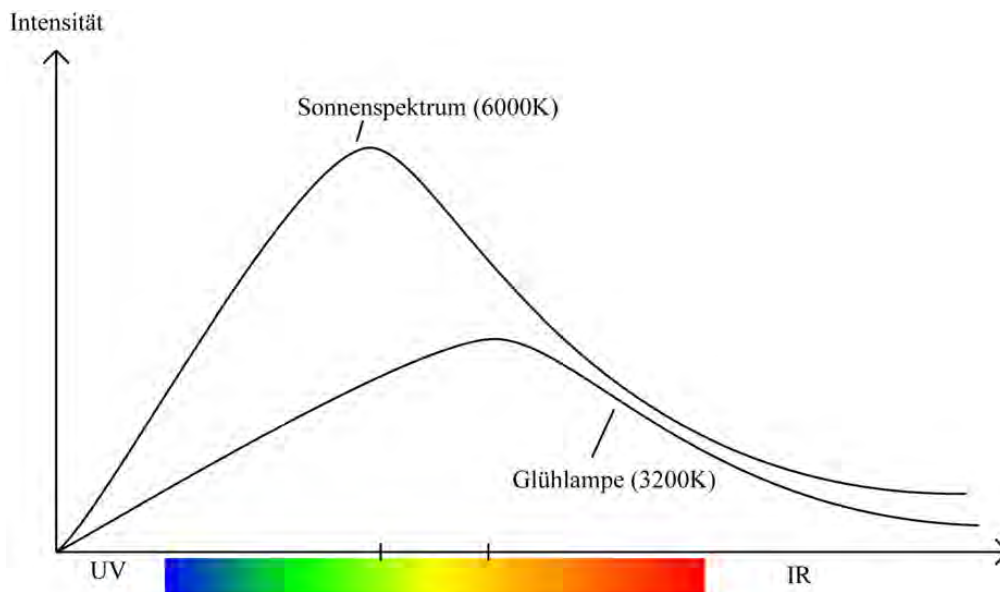
$$\beta = 180^\circ - \delta - 45^\circ$$

8<sup>00</sup> Uhr:

Der geschichtliche Standort des Michelson-Morley-Experiments liegt im 19. Jahrhundert. Sein Grundprinzip wird in der Klasse wiederholt. Der Lehrer verweist auf die Unterscheidung zwischen longitudinalen und transversalen Wellen. Der Äther ist laut Versuchsergebnis also nicht longitudinal kompressibel und kann nicht existieren. Das wiederum bedeutet, dass es kein Ruhesystem für Licht gibt. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist demnach überall gleich und völlig unabhängig vom Bezugssystem. Der Lehrer nimmt als Beispiel für die Relativität den Ballwurf im fahrenden Zug. Die Lichtgeschwindigkeit ist also eine Naturkonstante. Die Konsequenzen dieser Erkenntnis werden auf den Folgetag verschoben.

8<sup>11</sup> Uhr:

Anschließend an den Schülerversuch mit dem Handspektroskop wird das Spektrum einer glühenden Quelle aufgegriffen. Die Intensität ist nicht für alle Farben gleich. Der tatsächliche Verlauf wird an die Tafel skizziert, zum Einen für die Sonne (6000K) und zum Anderen für eine Glühlampe (3200K). Die Farbe maximaler Intensität ist von der Temperatur abhängig.



Man nimmt an, dass die Schwingung lichterzeugender Oszillatoren nur in bestimmten Stufen erfolgt und es keine Zwischenstufen gibt. Daher kann auch Energie nicht beliebig, sondern nur in kleinen Paketen abgegeben werden und es gilt

$$E = h\nu$$

Dabei ist  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $\nu$  die Frequenz des ausgesandten Lichts. Mit fallender Temperatur sinkt auch die Energie einer Lichtquelle und somit die Intensität der hochfrequenten Anteile. Eine energiearme Lichtquelle sendet also wenig Blau aus.

### Erzählteil

#### 8<sup>19</sup> Uhr:

Die Konsequenzen des Michelson-Morley-Versuchs werden durch einen Tafelanschrieb zusammengefasst:

*Es gibt keinen Äther (Licht braucht kein Medium). Es kann kein absolut ruhender Punkt bestimmt werden („alles ist relativ“). Die Lichtgeschwindigkeit ist eine Naturkonstante und für alle Beobachter (ruhend oder in Bewegung) gleich. Ergänzend wird auf Anfrage noch mal die gedankliche Entstehung des Ätherwindes erklärt. Auch die Erkenntnisse durch Max Planck werden schriftlich festgehalten: Max Planck beschrieb das Spektrum der „Schwarzkörperstrahlung“ (schwarze Gegenstände nehmen am meisten Wärme auf, kühlen aber auch am schnellsten wieder ab). Bei hoher Temperatur sind die Blau-Anteile höher. Licht geht von Oszillatoren (Schwingern) aus. Sie können nicht mit beliebiger Amplitude (Schwingungsweite) schwingen. Es ist  $E = h\nu$ . Bei niedriger Temperatur reicht die Energie nicht, um hochfrequente Oszillatoren (Blau) anzuregen. Deshalb ist der Anteil von orangen/roten Oszillatoren größer (z.B. Rotglut).*

### Zusammenfassung an der Tafel

#### 8<sup>45</sup> Uhr:

Im Lehrer-Schüler-Gespräch wird die Polarisationserscheinung vom Vortag wiederholt. Die Plarisationseigenschaft kann z.B. genutzt werden, um den Zuckergehalt in Trauben zu bestimmen, da Zucker die Polarisationsenebene dreht. Die Beobachtungen werden an einem Tafelbild zusammengefasst.

#### 9<sup>00</sup> Uhr bis 9<sup>10</sup>: Pause

Die verschiedenen nekannten Arten der Elektrizität werden wiederholt. Reibt man Leder an Glas entsteht positive Ladung. Bei der Kombination aus Fell und Plastik entsteht dagegen negative Ladung. Wird ein Elektroskop nun mit diesen Elektronen beladen und anschließend mit dem Licht einer Quecksilberdampfampe bestrahlt, dann entläd es sich relativ schnell. Nun werden verschiedene Farbfilter in den Lichtweg gehalten und der Versuch mehrmals

wiederholt. Bei den Rot Grün und Blau durchlässigen filtern ist keine Entladung mehr zu beobachten. Hält der Lehrer aber einen schwarzen Filter vor die Lampe, so setzt die Entladung wieder ein. Verantwortlich für die Entladung muss also der unsichtbare Anteil des Spektrums sein: das UV-Licht. Die Schüle blicken nun selbst durch die Filter in die Lichtquelle.

9<sup>18</sup> Uhr:

Die Beobachtungen werden zusammengefasst. Außerdem verweist der Lehrer die Schüler auf die Wichtigkeit eines UV-Filters in der Sonnenbrille, da sich durch die Lichtreduzierung die Pupille weitet, das hochenergetische UV-Licht so noch mehr ins Auge gelangt.

9<sup>23</sup> Uhr: Ende der Stunde

### **Donnerstag, den 2. April 2009**

7<sup>54</sup> Uhr:

Der Lehrer wiederholt zur Vorbereitung auf die nächste Physikprobe die Berechnung der Wellenlänge am Mehrfachspalt. Das gesamte Prinzip der konstruktiven Überlagerung und der zugehörigen Mathematik wird in der Klasse besprochen.

8<sup>05</sup> Uhr:

Die Schüler sollen nun selbstständig den nötigen Abstand einer DVD zum Auge berechnen, sodass das erste Maximum der grünen Linie noch zu sehen ist. Es sind folgende Daten gegeben:

$$\lambda = 550nm$$

$$d = 0,74\mu m$$

$$a = 11cm$$

$$l = ?$$

Die Schüler arbeiten zusammen. Sie haben noch Probleme beim Umgang mit negativen Potenzen am Taschenrechner. Der Lehrer läuft durch die Bankreihen um Probleme zu erkennen.

8<sup>15</sup> Uhr:

Der Lehrer schreibt den Lösungsweg an die Tafel. Es ergibt sich  $l = 10cm$ . Verglichen mit einer CD entspricht der Abstand etwa der Hälfte. Die Rillen einer DVD sind viel enger beieinander, so der Lehrer, daher sind die Farben weiter gespreizt.

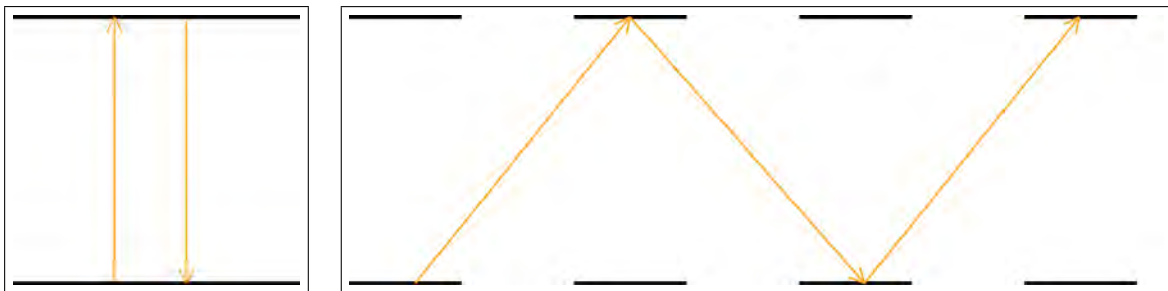
8<sup>19</sup> Uhr:

Die Beobachtungen am Elektroskop vom Vortag werden in der Klasse wiederholt. Der Versuch kann noch verfeinert werden in einer Photozelle. Die offenbar herasgeschlagenen Elektronen müssen dabei gegen ein elektrisches Feld anlaufen. Durch Regelung einer Spannung

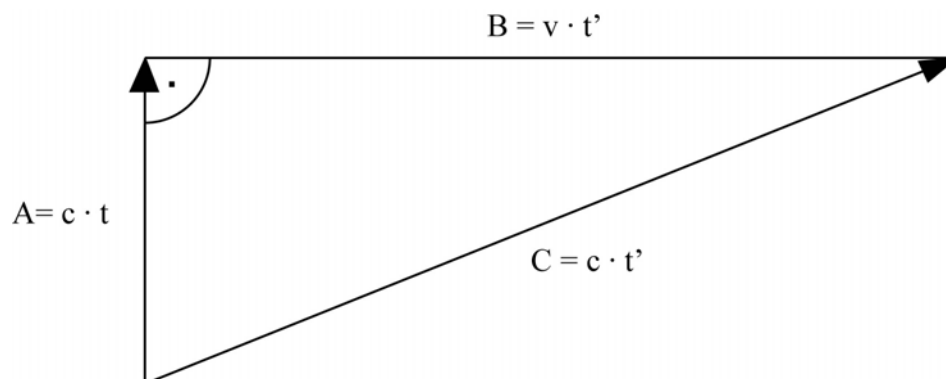
U kann der Strom an der Anode bis auf Null reduziert werden. Diese Grenzspannung ist aber unabhängig von der Intensität des Lichts. Die Energie scheint also nur von der Farbe abhängig zu sein. Dabei wird der bekannte Zusammenhang  $E = h\nu$  wiederholt. Ultraviolettes Licht hat demnach viel Energie, infrarotes Licht wenig. Licht transportiert in gewisser Weise Energie. Dieser Versuch widerlegt die Teilchentheorie, denn Elektronen werden offensichtlich aus Metall herausgeschlagen. Der Lehrer diktiert die Zusammenfassung zum Photoeffekt.

8<sup>36</sup> Uhr:

Das Paradoxon zur Lichtgeschwindigkeit  $c$  wird wiederholt. Der Lehrer führt mit der Klasse ein Gedankenexperiment durch, während die Schüler bereits unruhig erscheinen bzgl. der unklaren Antwort auf die Frage, ob Licht nun Welle oder Teilchen sei. In einer Lichtuhr wird ein Lichtimpuls zwischen zwei parallelen Spiegeln ständig hin- und zurückgespiegelt. Bewegt sich die Uhr mit Geschwindigkeit  $v$  dann sieht der mitbewegte Beobachter trotzdem eine ruhende Uhr und einen parallelen Lichtimpulsverlauf (linkes Bild). Der Außenbetrachter sieht aber einen zickzackförmigen Verlauf (rechtes Bild).



Bei dieser Vorstellung haben einige Schüler Probleme. Die veränderte Strecke vom ruhenden System aus gesehen, lässt sich in einem rechtwinkligen Dreieck ausdrücken.



Dabei sind  $t$  und  $t'$  Zeitspannen ( $t' > t$ ). Die Beziehung kann mittels Pythagoras dargestellt werden. Der Lehrer leitet an der Tafel her:

$$\begin{aligned}
 B^2 + A^2 &= C^2 \\
 (vt')^2 + (ct)^2 &= (ct')^2 \\
 \dots &= \dots \\
 \frac{t'}{t} &= \sqrt{\frac{1}{1 - (\frac{v}{c})^2}} \\
 t' &= \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \cdot t
 \end{aligned}$$

8<sup>55</sup> Uhr bis 9<sup>03</sup> Uhr: Pause

Die Schüler sollen nun für verschiedene Geschwindigkeiten  $v$  den Verlängerungsfaktor  $\gamma = \frac{1}{1 - (\frac{v}{c})^2}$  der Zeit berechnen und in einer Tabelle zusammenstellen.

$v$ in $\frac{km}{s}$	$\frac{v}{c}$	$\gamma$
30 000	$\frac{1}{10} = 0,1$	1,005
150 000	$\frac{1}{2} = 0,5$	1,15
290 000	0,967	3,9
299 000	0,997	12,25

Der Lehrer erklärt, dass Astronauten trotzdem nicht langsamer alt werden, da die Geschwindigkeit zu gering ist.

9<sup>10</sup> Uhr:

Der Lehrer zeigt in der Klasse eine Versuchsvorrichtung, die einen Kondensator mit Spule an einer Hochspannungsquelle (7000 V) enthält. Etwa im Sekundentakt zündet eine eingebaute Funkenstrecke. Der Funken erscheint bläulich bis violett.

9<sup>22</sup> Uhr:

Ende der Unterrichtsstunde

**Freitag, den 3. April 2009**

7<sup>54</sup> Uhr:

Zu Beginn der Stunde sollen die Schüler gemeinsam erarbeiten, wie die Wellenlänge eines Laser mit Papier, CD, Laser und einem Meterstab ermittelt werden kann. Dabei geht es weniger um die Berechnung, sondern mehr um den Versuchsaufbau.

8<sup>05</sup> Uhr bis 8<sup>50</sup> Uhr: letzte Physikprobe und anschließende Pause

9<sup>04</sup> Uhr:

Anknüpfend an der Versuch vor der Probe, geht der Lehrer etwas tiefer auf den HeNe-Laser und seine Funktion ein. Dabei wird in erster Linie die Abkürzung „LASER“ geklärt. Das Gemisch aus Helium und Neon ist auf Grund der erforderlichen Besetzungsumkehr notwendig.

9<sup>15</sup> Uhr:

Die Unklarheit, ob Licht nun Welle oder Teilchen ist, bleibt erhalten. Das Interferenzbild hinter einem Doppelspalt kennen die Schüler bereits, sowohl für hohe, als auch für niedrige Lichtintensität. Aber selbst ein einzelnes Photon verhält sich wie eine Welle und scheint durch beide Spalte durchzulaufen. Zusammenfassend betont der Lehrer, dass die Wellen- und Teilchentheorien Modelle sind und nicht der Realität entsprechen. Die Auswirkungen der Relativitätstheorie bringt er den Schülern durch ein Beispiel näher. Mit ihr lässt sich nämlich die Ankunft kurzlebiger Teilchen auf der Erde erklären, die eigentlich nicht ankommen dürften. Aber durch ihre hohe Geschwindigkeit, erleben sie eine „Zeitdehnung“ und „Streckenkomprimierung“, sodass sie ihre Lebensdauer von Außen betrachtet verlängern. Der Mensch kann diese Eigenschaft aber nicht nutzen, da man gezielt keine solch hohen Geschwindigkeiten erreicht. Denn eine Kraftwirkung bzw. Beschleunigung verursacht nicht nur eine Geschwindigkeitszunahme, sondern auch eine Massezunahme die für große Geschwindigkeiten enorm ist und für eine weitere Beschleunigung daher riesige Kräfte erfordert. Kein Teilchen lässt sich auf  $c$  beschleunigen, aber es können schon annähernd hohe Werte erreicht werden.

9<sup>27</sup> Uhr: Ende der letzten Stunde

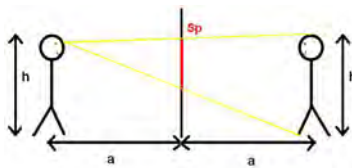
## 11.3 Unterrichtsskizzen zur selbstgestalteten Woche

Die folgenden Unterrichtsskizzen beschreiben keinesfalls vollständig den durchgeführten Unterricht, sondern entsprechen nur den persönlichen (abgetippten) Aufzeichnungen zur Orientierung im Unterricht. Alle blau markierten Textinhalte waren als Tafelanschrieb oder wörtliches Diktat geplant.

### Montag, den 23. März 2009

#### ① Einstieg: Spiegelaufgabe

Frage: Welche Eigenschaften haben Bildraum und Bildperson? Wie groß muss demnach ein Spiegel sein, damit man sich ganz darin erkennt?



#### ② Wiederholung: Brennweitenbestimmung einer Sammellinse

Versuchsbeschreibung, Abbildungsgleichung

Spezialfall:  $B = G$ , Bedingung:  $g = 2f$

Was passiert allg. mit  $\frac{B}{G}$  für  $g = a \cdot f$ ?

Es gilt  $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$  und  $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a \cdot f}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a \cdot f}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{a-1}{a \cdot f} \quad | \text{stürzen}$$

$$b = \frac{a \cdot f}{a-1}$$

$$\Rightarrow \frac{B}{G} = \frac{\frac{a \cdot f}{a-1}}{a \cdot f}$$

$$\boxed{\frac{B}{G} = \frac{1}{a-1}}$$

Überprüfen der Erkenntnis aus vorheriger Stunde ( $a = 2$  setzen)

Beh: Gleichung gilt für alle  $a$ ! Warum gibt es Problem? Betrachte  $a=1$ :

ABER:  $a \neq 1$ , denn für  $g = f$  gibt es kein Bild

③ Neues Thema: Beugungserscheinungen

Versuch 1: Stift gegen Glühlampe

Versuch 2: Blick auf schwarz-weiß-Muster durch Spalt

Versuch 3: Blick auf längliche Glühlampe durch Spalt

⇒ Schüler sollen Beobachtungen zeichnen

PAUSE

Bisher fester, dünner Spalt → nun veränderbar

Versuch 4: Veränderbarer Spalt vor schmaler Lichtquelle

Beobachtungen beschreiben und in drei Stufen zeichnen

④ Zusammenfassungen der Beobachtungen und Herausgabe der 1. Physikprobe

**Dienstag, den 24. März 2009**

① Einstieg: Geometrieaufgabe

ges:  $x$ ?

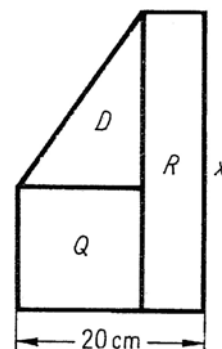
Lösungsmöglichkeit:

$$\text{Es gilt: } Q = D = R$$

$$D + D + Q + R = x \cdot 20 \text{ cm}$$

$$4R = x \cdot 20 \text{ cm}$$

$$R = x \cdot 5 \text{ cm}$$



⇒  $Q$  hat Seitenlänge 15 cm und Dreieck  $D$  muss wegen gleicher Fläche doppelt so hoch sein

$$\Rightarrow x = 3 \cdot 15 \text{ cm} = 45 \text{ cm}$$

② Wiederholung und Rechenbespiele zur Linsenabbildung:

Berechne  $\frac{B}{G}$  über  $\frac{B}{G} = \frac{1}{a-1}$  für  $g = a \cdot f$ !

a)  $g = 1,5 \cdot f$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{1,5 - 1} = \frac{1}{0,5} = 2$$

⇒  $B$  ist doppelt so groß wie  $G$



b)  $g = 6 \text{ cm}, f = 2 \text{ cm}$

$$a = 3 \Rightarrow \frac{B}{G} = \frac{1}{2}$$

$\Rightarrow$  B ist halb so groß wie G

c)  $g = \frac{3}{4} \cdot f$  Skizze

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{-\frac{1}{4}} = -4$$

– B ist für  $g > 2f$  reell und kleiner als G

– B ist für  $f < g < 2f$  reell und größer als G

– B ist für  $g < f$  nicht reell (virtuell) und größer als G

③ Wiederholung der Beobachtungen vom Vortag  
(selber mitnotieren lassen bzw. Diktat)

zu V1: Licht dringt an einem Hindernis in den geometrischen Schattenraum ein. Dieses Verhalten nennt man Beugung.

$\rightarrow$  erklärt folgende Versuche

zu V2: Die Beugung des Lichts verzerrt das Muster senkrecht zum Spalt

zu V3: Halogenstab hat vertikale Unterteilungen, so kaum sichtbar. Durch Verschmierung (Beugung) nach oben/unten besser zu sehen

Glühwendel-Unterteilungen werden durch Verzerrung besser sichtbar. Die vertikale Verschmierung weist mehrere dunkle und helle Stellen auf, die Lampe scheint nach oben/unten vervielfacht mit farbigen Rändern

zu V4: Die Beugung des Lichts ist umso deutlicher, je enger der Spalt

Beugung ist Widerspruch zu Newtons Korpuskeltheorie

④ Versuch 5: Beugung am Mehrfachspalt

a) Doppel-/Dreifach-/Vierfachspalt bei gleicher Spaltbreite

b) Transmissionsgitter mit  $\frac{80}{\text{cm}}$  ( $d = \frac{1}{8} \text{ mm}$ )

c) Transmissionsgitter mit  $\frac{250}{\text{cm}}$  ( $d = \frac{1}{25} \text{ mm}$ )

d) Transmissionsgitter mit  $\frac{600}{\text{mm}}$  ( $d = \frac{1}{600} \text{ mm}$ )

Doppelspalt: Thomas Young (1802)

Gitter: Fraunhofer (1821)

Was fällt bei Farblinie auf?  $\rightarrow$  Symmetrie

Abstände ausmessen lassen, Geometrie in Skizze darstellen, Tabelle anfertigen

Mittwoch, den 25. März 2009

① Einstieg: Geometrieaufgabe

ges:  $\alpha$

Lösungsmöglichkeit:

$$\text{Es gilt } \alpha = 90^\circ - \gamma$$

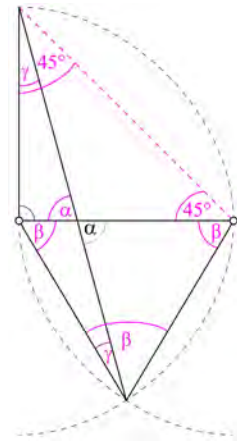
und im gleichseitigen Dreieck  $\beta = 60^\circ$

$$\Rightarrow 2 \cdot \beta - \gamma + \alpha = 180^\circ$$

$$\Leftrightarrow \alpha - \gamma = 60^\circ$$

$$\Rightarrow 2\alpha = 150^\circ$$

$$\alpha = 75^\circ$$



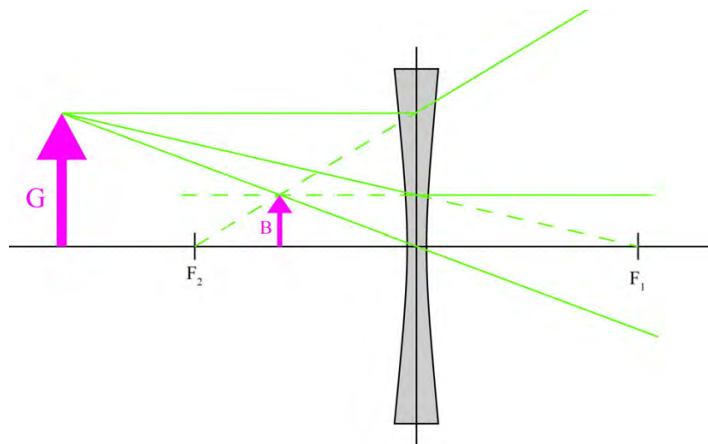
② Konstruktion an Zerstreuungslinse

Wdh. der Beobachtungen an Konkavlinse (letzte Woche)

- Parallelstrahl  $\rightarrow$  Aufweitung, von Brennpunkt kommend
- zentraler Strahl
- Brennpunktstrahl

Konstruktion ähnlich wie bei Sammellinse

Konstruktion von B bei Zerstreuungslinse



Beachte:  $F_1 \leftrightarrow F_2$  vertauscht, math. ausgedrückt durch  $f < 0$

G-Pfeil zeigt nach oben und ist auf G-Seite

Wdh. von gestern: math. Äußerung durch  $B < 0$  und  $b < 0$

Berechnung von  $\frac{B}{G}$  zur Angabe  $g = 9$ ,  $f = -6$  (2 Gruppen):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \text{ und } \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g}$$

$$= \frac{1}{(-6)} - \frac{1}{9}$$

$$= -\frac{3}{18} - \frac{2}{18}$$

$$= -\frac{5}{18}$$

$$b = -\frac{18}{5}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} = \frac{-\frac{18}{5}}{9}$$

$$= -\frac{18}{5} \cdot \frac{1}{9}$$

$$= -\frac{2}{5}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{a-1} \text{ und } g = a \cdot f$$

$$9 = a \cdot -6$$

$$\Rightarrow a = -\frac{9}{6} = -\frac{3}{2}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{-\frac{3}{2} - 1}$$

$$= \frac{1}{-\frac{5}{2}}$$

$$= -\frac{2}{5}$$

### ③ Wdh. zu Versuch 5

Zusammenfassung durch Zeichnung und Tafelanschrieb

Versuch 5: Beugung am Mehrfachspalt (Transmissionsgitter)

#### a) Mehrfachspalte mit festem Spaltabstand

drei helle Streifen innerhalb des Beugungsbildes, mit Anzahl der Spalten heller, deutlicher, schärfer

Erhellung ist klar, da mehr Spalten

#### b) Mehrfachspalte mit unterschiedlichen Spaltabständen d

80 Striche/cm

(d=0,125mm)

250 Striche/cm

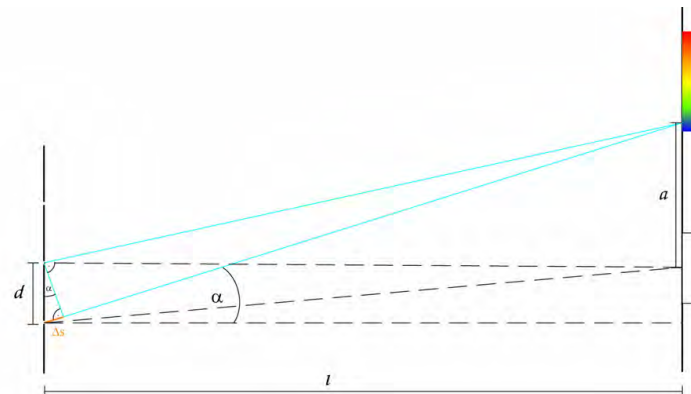
(d=0,04mm)

600 Striche/mm

(d=0,00176mm)

Farbstreifen sind symmetrisch zum weißen Mittelstreifen und werden nach außen hin dunkler und unschärfer

PAUSE



Gangunterschied  $\Delta s$  für alle Farben verschieden, aber an einem Punkt für alle gleich  
 → weißer Streifen

Aufgreifen der Tabelle vom Vortag und Berechnung von  $\Delta s$  über

$$\tan \alpha = \frac{a}{l} \quad \text{und} \quad \sin \alpha = \frac{\Delta s}{d}$$

Tabelle mit Vorsätzen

Werte:

$$\Delta s_v = 400nm$$

$$\Delta s_g = 466nm$$

$$\Delta s_o = 566nm$$

$$\Delta s_r = 633nm$$

Alle Versuch verwerfen Newton

1802: Thomas Young, Doppelspaltversuch

1821: Joseph Fraunhofer,  $\lambda$ -Bestimmung am Gitter

- ④ neue Erklärung durch Huygens'sches Prinzip (1690), nur mündlich  
 Versuch 6: Beobachtungen in der Wellenwanne

- a) Elementarwelle
- b) Mehrfachanregung
- c) Wellenfront am Spalt

Beobachten und selbst mitnotieren lassen

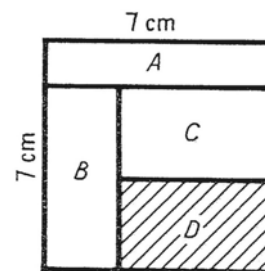
Donnerstag, den 26. März 2009

① Einstieg: Geometrieaufgabe

geg:

$$U_A = U_B = U_C = U_D$$

ges: D



Offensichtlich ist  $b_D = b_C \Rightarrow h_D = h_C$

Weiter gilt  $b_C = 7 - b_B$  und wegen  $U_B = U_C$  auch  $h_C = b_C - b_B = 7 \text{ cm} - 2b_B$

Aus  $U_A = U_B$  und  $2h_C + h_A = 7$  folgt:

$$b_B = 14 - 4h_C \stackrel{!}{=} b_C - h_C$$

$$\Rightarrow b_C = 14 - 3h_C$$

...

$$b_D = b_C = 5 \text{ und } h_C = h_D = \frac{1}{2}h_B = 3$$

$$\Rightarrow D = 15$$

② Tabelle ergänzen

<i>M</i>	Mega	$10^6$	= 1000000	
<i>k</i>	Kilo	$10^3$	= 1000	
<i>d</i>	Dezi	$10^{-1}$	= 0,1	= $\frac{1}{10}$
<i>c</i>	Zenti	$10^{-2}$	= 0,01	= $\frac{1}{100}$
<i>m</i>	Milli	$10^{-3}$	= 0,001	= $\frac{1}{1000}$
$\mu$	Mikro	$10^{-6}$	...	...
<i>n</i>	Nano	$10^{-9}$	...	...
<i>p</i>	Piko	$10^{-12}$	...	...
<i>f</i>	Femto	$10^{-15}$	...	...

Farbe	violett	grün	orange	rot
Abstand $a/\text{cm}$	6,0	7,0	8,5	9,5
Winkel $\alpha/^\circ$	0,57	0,67	0,81	0,91
$\Delta s/\text{nm}$	400	467	566	633

### ③ Huygens'sches Prinzip (1690)

- Licht breitet sich in Form einer räumlichen Welle aus
- Dabei wird jeder Punkt der Welle als Ausgangspunkt einer Elementarwelle (mit gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz) betrachtet
- Die Einhüllende der Elementarwellen ergibt die neue Wellenfront zum späteren Zeitpunkt

Wo liegt Unterschied zu anderen Wellen? → Medium → Äther

Versuch 6 besprechen und zeichnen

Beugung lässt sich nun klären, aber Stellen ohne Wellen?

d) Doppelspalt

Beobachtung besprechen und zeichnen

Überlagerungserscheinung am Tageslichtprojektor zeigen → Zeichnung austeilen

PAUSE

### ③ Einführung der Interferenz

Auslenkung aus Ruhelage kann durch Vektorpfeile dargestellt werden, bei Überlagerung → Vektoraddition

Trifft Berg auf Tal → Auslöschung

Treffen Wellenzüge aufeinander, werden Auslenkungen an jedem Ort addiert. Anschließend laufen sie unbeeinträchtigt wieder auseinander. Dabei kann es zu einer Amplitudenverdoppelung oder Auslöschung kommen. Diese Überlagerungserscheinung heißt *Interferenz*

Was könnte nach Huygens  $\Delta s$  sein? → Wellenlänge

Klärung der

- Entstehung von Farblinien
- Symmetrie der Farblinien
- Wiederholung der Farblinien

Versuch 7: Interferenz von Schallwellen

**Freitag, den 27. März 2009**

- ① Abhalten der 2. Physikprobe
- ② Anwendungsbeispiel zu Linsen: Mikroskop (grobe Skizze)
- ③ Versuch 7: Interferenz von Schallwellen  
Tafelanschrieb nachholen, Versuch nochmal durchführen  
 $\lambda \approx 70 \text{ cm}$ ,  $f = 440 \text{ Hz}$   
Verstärkung und Auslöschung ist hörbar
- ④ Versuch 8: Spektrum einer Quecksilberdampfampe  
Spektrum zeigen, UV-Linien nur vor optischem Aufheller sichtbar  
→ Abstände ausmessen lassen

## 11.4 Physikproben

### 1. Physikprobe 12.Klasse

20.03.09

1. Eine 60cm lange Leuchtstoffröhre beleuchtet aus 1,20m Abstand einen 20 cm breiten Gegenstand. Der Schatten wird auf eine Wand 80cm hinter dem Gegenstand geworfen.
  - a) Gibt es einen Kernschatten an der Wand?
  - b) Ermitteln Sie die Breite eines Halbschattens.
  - c) Beantworten Sie die beiden Fragen mit Hilfe von Rechnungen.
  
2. Farbiger Schatten
  - a) Skizzieren und beschriften Sie den Versuchsaufbau zur Erzeugung des farbigen Schattens.
  - b) Erläutern Sie, wie die beiden Schattenbilder zustande kommen und wie die Farben entstehen?
  - c) Welcher der beiden Schatten wird als „farbiger Schatten“ bezeichnet? Was spricht dagegen, dass es ein Nachbild sein könnte? (Dazu müssen Sie auch auf die Eigenschaften eines Nachbildes eingehen.)
  
3. Beschreiben Sie, unter welchen Bedingungen ein trübes Medium Farben hervorbringen kann. (Welche Farben?) Nennen Sie dazu Beispiele aus der Natur.
  
4. „Brechung“
  - a) Beschreiben Sie ein einfaches (alltägliches) Phänomen der Brechung.
  - b) Unter welchem Winkel muss man auf eine Wasseroberfläche ( $n=1,33$ ) blicken, dass der Blick im Wasser einen Winkel von  $60^\circ$  zur Oberfläche hat?
  - c) Berechnen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion für ein Glas mit dem Brechungsindex  $n=1,6$ .
  - d) Überlegen Sie sich eine Anordnung, mit der man den Grenzwinkel der Totalreflexion für Glas experimentell bestimmen könnte? Skizze!



12. Klasse

27.03.2009

## 2. Physikprobe

1. **Brennweitenbestimmung** (5+2)

- a) Skizzieren und beschriften sie den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Brennweite  $f$  einer Linse!  
Wie lässt sich  $f$  schließlich ermitteln?
- b) Für welche Art von Linse ist der Versuch durchführbar? Warum?

2. **Linsensbilder** (4+5+1+2)

Eine 10 cm hohe Kerze befindet sich im Abstand von 50 cm vor einer Linse der Brennweite  $f=30$  cm.

- a) Wo liegt das Bild der Kerze und wie groß ist es? Berechnen sie!
- b) Konstruieren sie B maßstabsgetreu!  
Vergleichen sie ihr Ergebnis mit Teilaufgabe a!
- c) Welche Eigenschaft hat das Kerzenbild?
- d) Wo muss die Kerze positioniert werden, damit das Bild verkleinert erscheint?

3. **Bilder** (3+2)

- a) Stellen sie die Eigenschaften des reellen und virtuellen Bildes gegenüber!
- b) Bei welcher Anwendung kann die Entstehung eines virtuellen Bildes genutzt werden und wie?

4. **Beugung** (2+3+3+2)

- a) Was versteht man unter Beugung und unter welchen Bedingungen wird sie sichtbar?
- b) Was besagt das Huygens'sche Prinzip?
- c) Was kann am Schirm hinter einem weiß beleuchteten Gitter beobachtet werden?
- d) Inwiefern widerspricht diese Beobachtung Newton's Teilchentheorie?

(34 Punkte)

12. Klasse

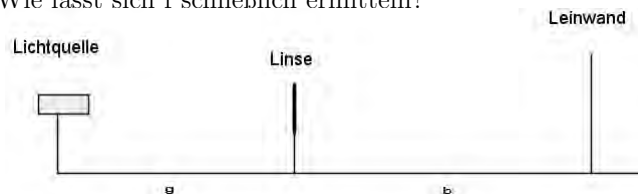
27.03.2009

## Lösung zur 2. Physikprobe

## 1. Brennweitenbestimmung (5+2)

- a) Skizzieren und beschriften sie den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Brennweite  $f$  einer Linse!

Wie lässt sich  $f$  schließlich ermitteln?



Die Leinwand wird für eine feste Gegenstandsweite  $g$  solange verschoben, bis das Bild der Lichtquelle (evtl. mit Schablone) auf der Leinwand scharf zu erkennen ist. Nun entspricht die Bildweite  $b$  genau dem Abstand von Linse zu Leuchtschirm. Nach Messung von  $b$  und  $g$  kann  $f$  über die Abbildungsgleichung  $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$  berechnet werden. Alternativ: Brennweitenbestimmung mit Sonne und Lupe

- b) Für welche Art von Linse ist der Versuch durchführbar? Warum?

Der Versuch ist nur für Sammellinsen (=Konvexlinsen) durchführbar, da nur sie ein reelles Bild auf der Leinwand erzeugen können.

## 2. Linsensbilder (4+5+1+2)

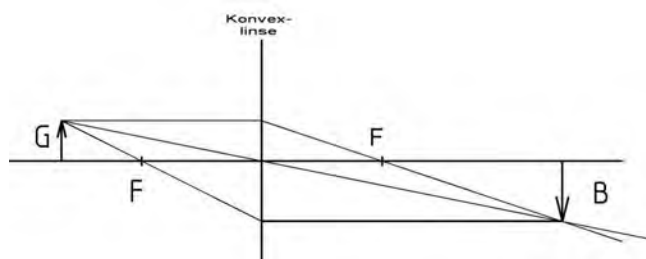
Eine 10 cm hohe Kerze befindet sich im Abstand von 50 cm vor einer Linse der Brennweite  $f=30$  cm.

- a) Wo liegt das Bild der Kerze und wie groß ist es? Berechnen sie!

$$\begin{array}{l|l} \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} & \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \\ \frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g} & \Rightarrow B = G \cdot \frac{b}{g} \\ \frac{1}{b} = \frac{1}{30\text{cm}} - \frac{1}{50\text{cm}} & \Rightarrow B = 10\text{cm} \cdot \frac{75\text{cm}}{50\text{cm}} \\ & = 10\text{cm} \cdot \frac{75}{50} \\ & = \frac{2}{150\text{cm}} = \frac{1}{75\text{cm}} & = 10\text{cm} \cdot \frac{15}{10} \\ \Rightarrow b = 75\text{cm} & \Rightarrow B = 15\text{cm} \end{array}$$

Das Bild der Kerze ist 15 cm groß und 75 cm von der Linse entfernt.

- b) Konstruieren sie B maßstabsgetreu!  
Vergleichen sie ihr Ergebnis mit Teilaufgabe a!



- c) Welche Eigenschaft hat das Kerzenbild?  
Es ist horizontal gespiegelt, steht also auf dem Kopf, außerdem vergrößert und reell.
- d) Wo muss die Kerze positioniert werden, damit das Bild verkleinert erscheint?  
Das Bild ist kleiner als der Gegenstand, wenn dieser sich außerhalb der doppelten Brennweite vor der Linse befindet ( $g > 2f = 60\text{cm}$ )

### 3. Bilder (3+2)

- a) Stellen sie die Eigenschaften des reellen und virtuellen Bildes gegenüber!  
Das virtuelle Bild entsteht auf der selben Seite der Linse, auf der sich der Gegenstand befindet, wogegen das reelle auf der anderen Seite zu finden ist. Das reelle Bild ist horizontal gespiegelt, während das virtuelle aufrecht steht. Das reelle Bild ist im Gegensatz zum virtuellen auf einer Leinwand darstellbar / auffangbar und „leuchtet“ tatsächlich selbst.
- b) Bei welcher Anwendung kann die Entstehung eines virtuellen Bildes genutzt werden und wie?  
Bei der Lupe. Hier wird ein Gegenstand innerhalb der Brennweite einer Sammellinse betrachtet, wobei ein virtuelles, vergrößertes Bild entsteht.

**4. Beugung** (2+3+3+2)

- a) Was versteht man unter Beugung und unter welchen Bedingungen wird sie sichtbar?

Unter Beugung versteht man das Eindringen des Lichts in den geometrischen Schattenraum an einem Hindernis. Ist das Hindernis oder ein Spalt sehr klein, so kann die Beugung direkt beobachtet werden.

- b) Was besagt das Huygens'sche Prinzip?

- Licht breitet sich in Form von Wellen aus
- jeder Punkt der Welle wird als Erreger einer neuen Elementarwelle verstanden
- die Einhüllende all dieser Elementarwellen ergibt die gesamte Welle (Spezialfall: Wellenfront) zu einem späteren Zeitpunkt

- c) Was kann am Schirm hinter einem weiß beleuchteten Gitter beobachtet werden?

An einer Leinwand ist ein zentraler, weißer Streifen zu erkennen. Symmetrisch zu diesem sind links und rechts weitere helle, farbige Streifen zu sehen, in welchen von Innen nach Außen die Farben violett, blau, grün, gelb, orange, rot durchlaufen werden. Diese Farbstreifen wiederholen sich beidseitig nach Außen hin, wobei sie immer undeutlicher und schwächer erscheinen.

- d) Inwiefern widerspricht diese Beobachtung Newton's Teilchentheorie?

In Luft befinden sich nach Newton alle Farbteilchen im Gleichgewicht. Erst bei Eintritt in ein Medium kommt es zu verschiedenen Beschleunigungen und einer Farbaufspaltung. Da das Licht im Versuch von 4c in kein anderes Medium eindringt, ist die wiederholte Farbaufspaltung des weißen Lichts mit Newton's Theorie nicht zu erklären.

(34 Punkte)

## 3. Physikprobe 12.Klasse

03.04.09

## 1. Interferenz

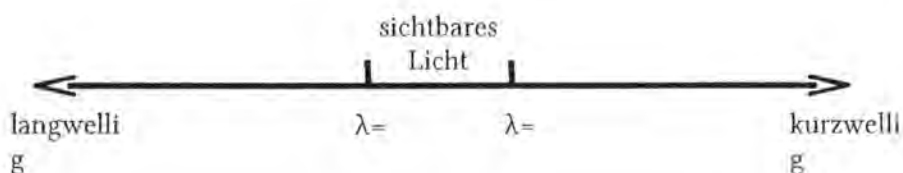
- a) Wenn man mit einer schmalen Lichtquelle auf ein optisches Gitter leuchtet, entstehen an der Leinwand hinter dem Gitter symmetrisch angeordnete, nach außen schwächer werdende, wiederholte Bilder der Lichtquelle (Streifen). Wie kann diese Erscheinung mit dem Wellenmodell des Lichts erklärt werden (Erklärung und Skizze dazu)? (4)
- b) Warum hat jeder Streifen einen Farbverlauf? (2)
- c) Wie wird dieses Phänomen in den Naturwissenschaften angewendet? (2)

## 2. Berechnung

- a) Eine DVD wird senkrecht (rechtwinklig) mit einem He-Ne-Laser (rot) beleuchtet. Der zurückgeworfene Lichtpunkt erscheint wiederholt auf einer parallel zur DVD angeordneten Leinwand. Der Abstand von der DVD zur Leinwand beträgt 12,0cm. Auf der Leinwand beträgt der Abstand zwischen dem direkten Spiegelbild und dem ersten Interferenzpunkt 19,6cm. Die DVD hat einen Spurbabstand von  $0,74\mu\text{m}$ . Welche Wellenlänge hat das Laserlicht? (4)

## 3. Elektromagnetisches Spektrum

- a) Ergänzen Sie die unten stehende Darstellung um weitere Strahlungsarten und tragen Sie beim sichtbaren Teil des Spektrums die Wellenlängen (ungefähre Werte) am linken und rechten Ende sowie die Farben ein: (4)



- b) Wie unterscheidet sich das Spektrum zweier mit unterschiedlicher Temperatur glühender Gegenstände? (Skizze und Beschreibung) (3)
- c) Welche Annahmen musste Max Planck machen, um das Spektrum eines schwarzen Strahlers zu erklären? (2)
4. Modellvorstellungen vom Licht
- a) Nennen Sie Kritikpunkte zum Wellenmodell. (2)
- b) Schildern Sie das Experiment, das den Teilchencharakter des Lichts zeigt. (4)

## 11.5 Fragebogen

Umfrage in der 12. Klasse

Freie Waldorfschule Würzburg

- männlich                       Mittlere Reife  
 weiblich                          Abitur

Kreuzen sie an, inwiefern die Aussagen auf sie zutreffen.

- ① ≙ trifft völlig zu  
 ② ≙ trifft zu  
 ③ ≙ teils/teils  
 ④ ≙ trifft eher weniger zu  
 ⑤ ≙ trifft überhaupt nicht zu

<b>Zur Physikepoche:</b>					
<b>Unterrichtswoche zu Linsen, Beugung, Interferenz</b>					
	1	2	3	4	5
1. Ich fand das Phänomen Beugung recht interessant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Ich fand das Phänomen Interferenz recht interessant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Mir war der Interferenzeffekt völlig neu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Die Versuche zu Beugung und Interferenz haben zum Verständnis enorm beigetragen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Mir war die Wellentheorie zum Licht bereits bekannt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. Die Wellentheorie zum Licht hat mich interessiert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. Das Thema „Linsen“ und ihre Abbildungseigenschaften habe ich als interessant empfunden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Die täglichen Rechenübungen zur Linsenabbildung haben zum Verständnis beigetragen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Die häufigen Konstruktionen zu Linsenabbildungen haben zum Verständnis beigetragen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. Ich habe den Einsatz einer anderen Lehrkraft im Zuge der Physikepoche als störend empfunden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
11. Der Unterricht war verglichen mit dem üblichen Physikunterricht zu anspruchsvoll gestaltet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
12. Die Lehrkraft konnte den Unterrichtsstoff gut vermitteln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
13. Die Unterrichtsführung ist auffallend stark vom üblichen Physikunterricht abgewichen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
14. Das Tafelbild war stets vollständig und verständnisfördernd	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
15. Die Lehrkraft schien auf den Unterricht gut vorbereitet zu sein	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
16. Die 2. Physikprobe war zu anspruchsvoll gestaltet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Allgemeines zum Physikunterricht	1	2	3	4	5
17. Ich interessiere mich allgemein für Physik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
18. Das Thema „Optik“ finde ich im Vergleich zu anderen Themen der Physik recht interessant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
19. Das Thema „Optik“ finde ich im Vergleich zu anderen Themen der Physik recht schwierig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
20. Ich finde es sinnvoll, dass Beobachtungen bei Experimenten erst in Folgestunden erklärt werden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
21. Ich mache mir auch nach dem Unterricht bewusst Gedanken über meine Beobachtungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
22. Die Experimente im Physikunterricht sind wichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
23. Die Experimente im Physikunterricht wecken mein Interesse am Fach	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
24. Ich könnte mir vorstellen, beruflich in die Richtung Physik/Technik zu gehen (Elektriker, Maschinenbauer, Astronaut,...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
25. Die Mathematik hinter den physikalischen Phänomenen trägt zum Verständnis bei	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
26. Die Mathematik hinter den physikalischen Phänomenen interessiert mich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
27. Die kurzen Geometrieaufgaben finde ich als Unterrichtseinstieg geeignet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
28. Ich denke dabei immer angestrengt mit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
29. Mir wäre ein klassischer Rhythmisierungsteil zu Unterrichtsbeginn lieber	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
30. Die historische Entwicklung physikalischer Errungenschaften interessiert mich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
31. Ich finde es sinnvoll, dass der Unterricht an der historischen Entwicklung orientiert ist	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
32. Die wöchentlichen Proben sind wichtig für die Einschätzung meines eigenen Verständnisses	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
33. Auch ohne die wöchentlichen Proben würde ich den Unterrichtsstoff anhand meines Epochenheftes wiederholen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
34. Die Proben setzen mich im negativen Sinne unter Druck	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
35. Ich messe meine Leistung in der Probe an den Leistungen meiner Mitschüler	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
36. Obwohl wir eine Klassengemeinschaft sind, besteht ein gewisses Konkurrenzdenken von meiner Seite	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Allgemeines zur Waldorfschule	1	2	3	4	5
37. Ich sehe es als Privileg in die Waldorfschule gehen zu dürfen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
38. Ich interessiere mich für Kunst (Schauspiel, Tanz, Malerei,...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
39. Die Möglichkeiten an dieser Schule mich künstlerisch und handwerklich auszuleben, bilden einen idealen Ausgleich zu den intellektuellen Anforderungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
40. Ich fühle mich in manchen Fächern dauerhaft überfordert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
41. Ich fühle mich in manchen Fächern dauerhaft unterfordert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
42. Ich habe manchmal Angst, die Waldorfschule könnte mich unzureichend auf meinen späteren Ausbildungsweg vorbereiten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
43. Ich habe im Alltag häufig mit negativen Vorurteilen gegen Waldorfschüler zu kämpfen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
44. Es belastet/nervt mich jedesmal wenn ich mit ihnen konfrontiert werde	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
45. Ich bin stolz darauf, die Waldorfschule besuchen zu können	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
46. Mein Freundeskreis besucht ebenfalls meine Schule	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
47. Den Zusammenhalt in meiner Klasse empfinde ich als sehr stark	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
48. Durch die gemeinsame Arbeit am Klassenspiel ist der Zusammenhalt gewachsen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
49. Obwohl die Klasse eine Gemeinschaft bildet, gibt es innerhalb Gruppen / Außenseiter	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
50. Ich freue mich auf die Osterferien ☺	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Hier können sie bei Bedarf Antworten ergänzen (z.B. Frage 13, Frage 47) oder sonstige Anmerkungen machen:

---



---



---



---



---



---



---



---



---



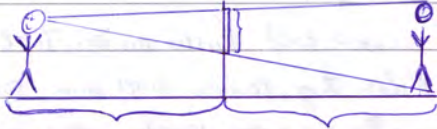
---



## 11.6 Einblick in einige Epochenhefte

## Aufzeichnungen eines Schülers

23.03.08



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

$$\frac{3}{G} = \frac{1}{1} \quad g = 2 \cdot f$$

$$g = a \cdot f$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a \cdot f} \quad | - \frac{1}{a \cdot f}$$

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{a \cdot f} = \frac{1}{b} \quad | \cdot a$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{a \cdot f} - \frac{1}{a \cdot f}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{a-1}{a \cdot f} \quad | \text{kreuzen}$$

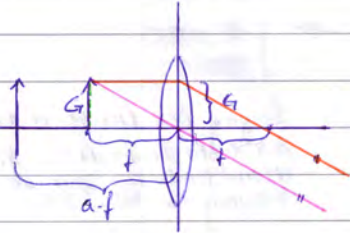
$$b = \frac{a \cdot f}{a-1}$$

$$\frac{3}{G} = \frac{b}{g}$$

$$\frac{3}{G} = \frac{\frac{a \cdot f}{a-1}}{a \cdot f}$$


$$\frac{3}{G} = \frac{1}{a-1}$$

für  $g = a \cdot f$



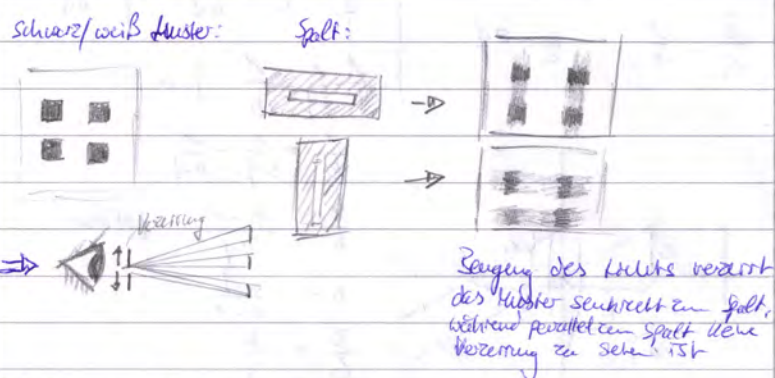
V. grelles Licht (Stift, Leuchtlampe)  
 → wir haben eine helle Leuchtlampe im vorderen Teil des Raumes aufgestellt und diese Lampe mit einem dünnen Stift mit einer gewissen Entfernung zugeeckt. Dabei wurde der Stift auf der Höhe der Lampe schräger (Elypsenartig) und das Licht erschien rechts und links des Stiftes ein wenig.

⇒ Licht drückt in den Bereich zwischen Scheitelpunkt des Hohlspiegels ein → Bögen



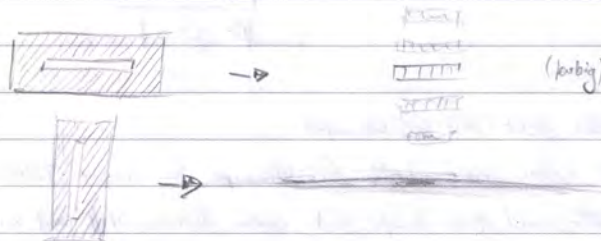
V Blick auf SW-Muster durch Spalt

Wir haben auf ein schwarz, weißes Muster an der Tafel geschaut, aber nicht mit bloßem Auge, sondern durch einen sehr feinen Spalt (Rasierklänge). Die schwarzen Vierecke verschwammen jeweils in die Richtung, in die die wir den Spalt nicht hielten, also gegenläufig.



V Blick durch Spalt auf längliche Lampe

Wenn man den Spalt der Rasierklänge horizontal hielt, erschien die längliche Lampe, wenn man den Spalt vertikal hielt, erschien die Lampe



Die Lampenunterteilungen werden durch die Verzerrung sichtbar, die vertikale Verzerrung zeigt helle und dunkle Stellen auf, Lampe wird oben und unten verjüngt

## V. Lichtspalt auf Plexiglas

→ Wir projizieren mit einem Diaprojektor einen Spalt auf eine trübe Plexiglasscheibe. Dabei entstanden Farben und es lagerten sich immer dunklere Schichten über einander und der Spalt (Lichtspalt) wurde breiter.

⇒ je enger der Spalt, desto sichtbar die  $\lambda$ -Abh.

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{a-1} \text{ für } g = a \cdot f$$

a)  $g = 1,5 \cdot f$

b)  $g = 6 \text{ cm}$        $f = 2 \text{ cm}$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

a)  $\frac{B}{G} = \frac{b}{1,5} \cdot \frac{1}{1,5-1} = \frac{1}{0,5} = \frac{1}{1/2} = \underline{\underline{2}}$  (Skizze)

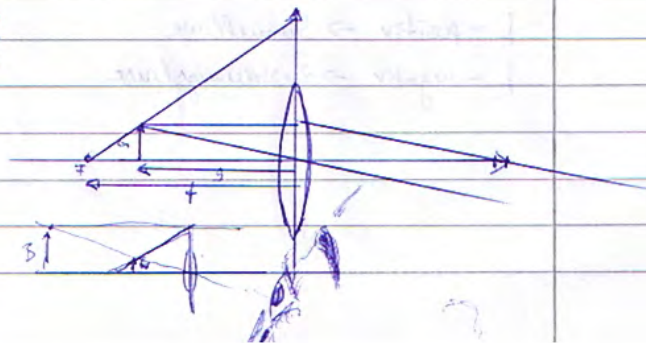
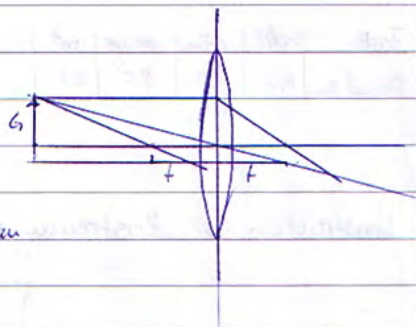
b)  $b_{\text{neu}} = a \cdot 2 \text{ cm}$

$$a = 3$$

$$\frac{B}{G} = \frac{1}{3-1} = \frac{1}{2}$$

c)  $g = \frac{3}{4} \cdot f$

$$\frac{B}{G} = -4$$



## Aufzeichnungen einer Schülerin

V<sub>12</sub> 80 Spalte pro cm:

Spalte sind nahe zusammen, in der Mitte am hellsten nach außen hin

250 Farben, scheinen eine Rundung zu geben

250 Spalte pro cm:

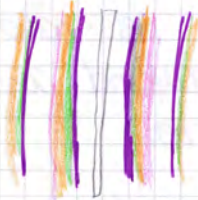
wenige Spalte und viele Farben (größere Farblecker)

ca. 600 Spalte pro cm:

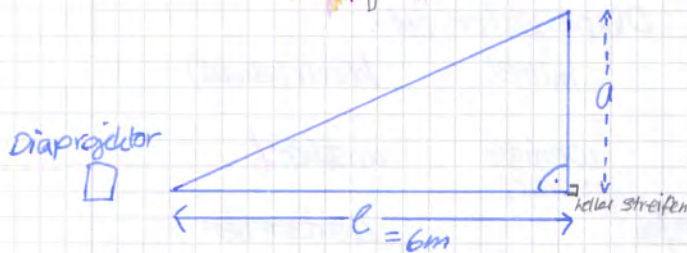
1 heller Streifen rechts + links

breiter Farbstreifen, großer Abstand, sehr deutlich

z.B. 80 Spalte



Beugung am Mehrfachspalt



Farbe	violett	grün	orange	rot
Abstand a/cm	6,0	7,0	8,5	9,5
$\alpha / ^\circ$	0,57	0,67	0,81	0,91

$\Delta s$  / nm | 400 | 467 | 566 | 633 | Wellenlänge bei Farben

Spaltabstand : 0,04 cm

250/cm

a) Mehrfachspalte mit einheitlichem Spaltabstand



unterschiedlich Graustufen,  
immer dunkler werdend  
Spalt

heller  
(in d. Mitte)  
schärfer  
kontrast-  
reicher

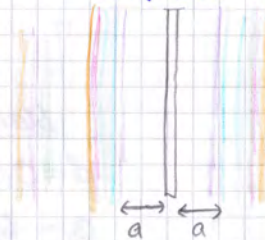
⇒ mehr Licht kommt vorne  
an, wenn die Spaltzahl  
erhöht wird

b) Mehrfachspalte mit versch. Spaltabständen  
(Transmissionsgitter)

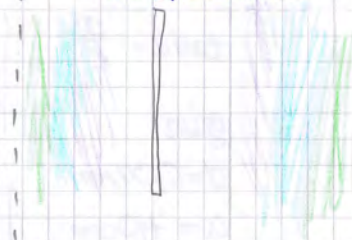
80/cm  
 $d = 0,125 \text{ mm}$



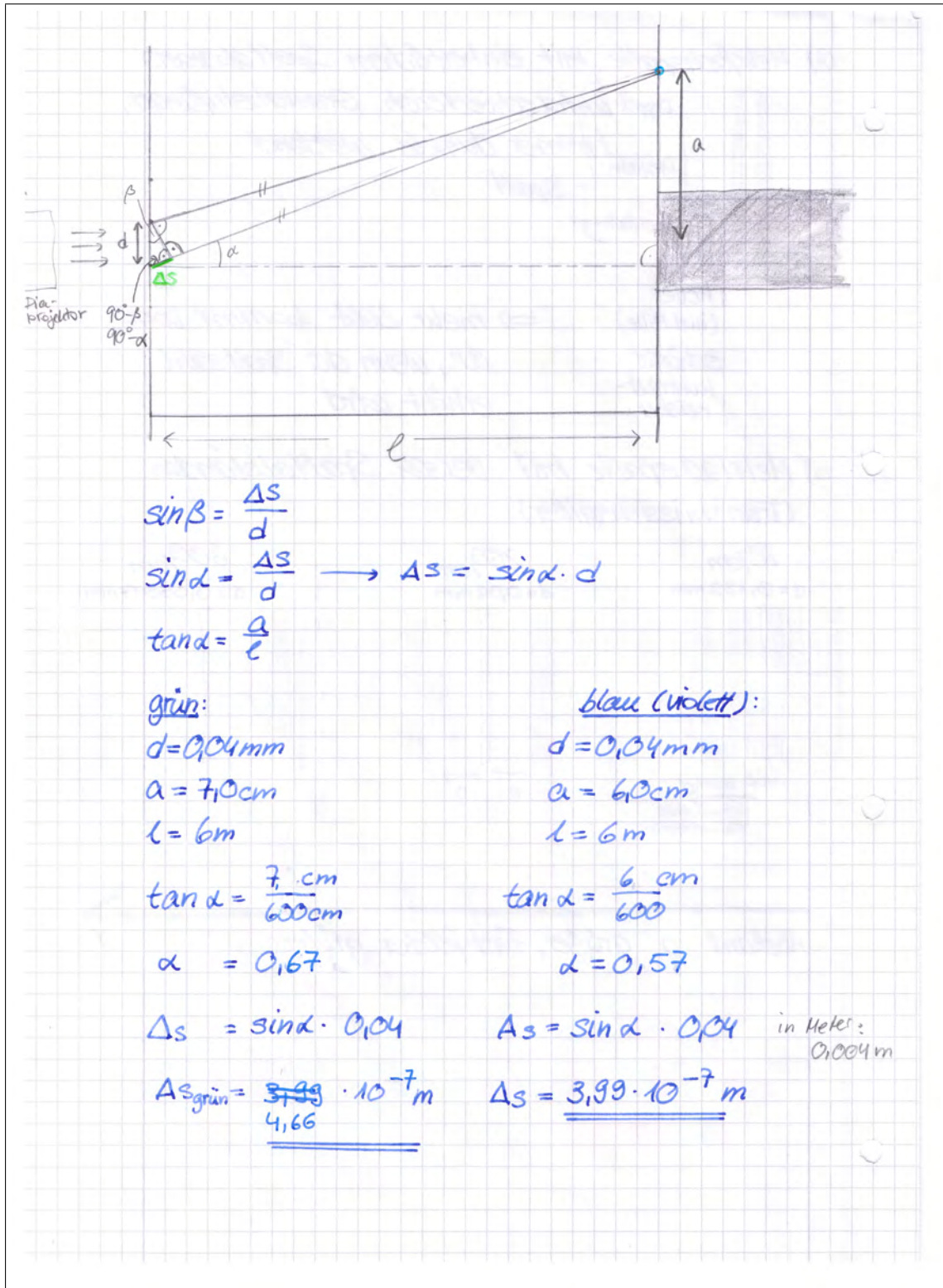
250/cm  
 $d = 0,04 \text{ mm}$



600/cm  
 $d = 0,00017 \text{ mm}$



Abstand  $a$  größer, Farbfelder größer

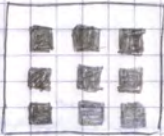






## Aufzeichnungen einer weiteren Schülerin

Versuch 1

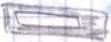

Durch Rasierklinge auf Schwarz-Weiß-Muster  
gedruckt: Spalt senkrecht  $\rightarrow$  schwarze  
Kästchen erscheinen wie waagerechte  
Linien, verschmimmen ineinander  
Spalt waagrecht  $\rightarrow$  schw. Kästchen ver-  
schmimmen zu senkrechten Linien

Säure:

$\frac{1}{2}$  Blick ~~auf~~ durch Stift auf  
Zylinderleuchte. Stift verdeckt Mitte der  
Leuchte, verschmimmt  $\rightarrow$  wird nach und  
nach dünner, Licht strahlt, frisst sich  
in Stift rein

$\frac{1}{3}$ : Blick durch Spalt auf längliche  
Leuchte  $\rightarrow$  horizontal: längliche Leuchte  
verschert (nach oben und unten, schüttelt,  
Fahren) man sieht jeweils waagerechte  
und senkrechte Streifen.

V<sub>4</sub> Licht durch Spalt auf Fläche, ganz klar  
 Spalt wird immer kleiner, erscheint einem  
 außen dicker als er innen, wird un-  
 deutlicher, kurz vor ganz zu ver-  
 schwindet Spalt mehr in horizontaler,  
 Farben treten auf beiden Seiten auf

G. Beugung des Lichts ist umso deutlicher/  
 sichtbar, desto kleiner der Spalt ist.

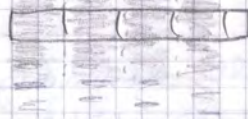
zu V<sub>2</sub>: Licht dringt ~~durch ein~~ <sup>an</sup> ~~ein~~ <sup>an</sup> Hindernis in  
~~den~~ <sup>geometrischen</sup> Schatten ein  
 Licht dringt an einem Hindernis  
 in den geometrischen Schatten ein  
 → Beugung

zu V<sub>1</sub>:



Beugung des Lichts verortet  
 das Muster senkrecht  
 zum Spalt, während  
 parallel zum Spalt  
 nichts passiert

zu V<sub>3</sub>:

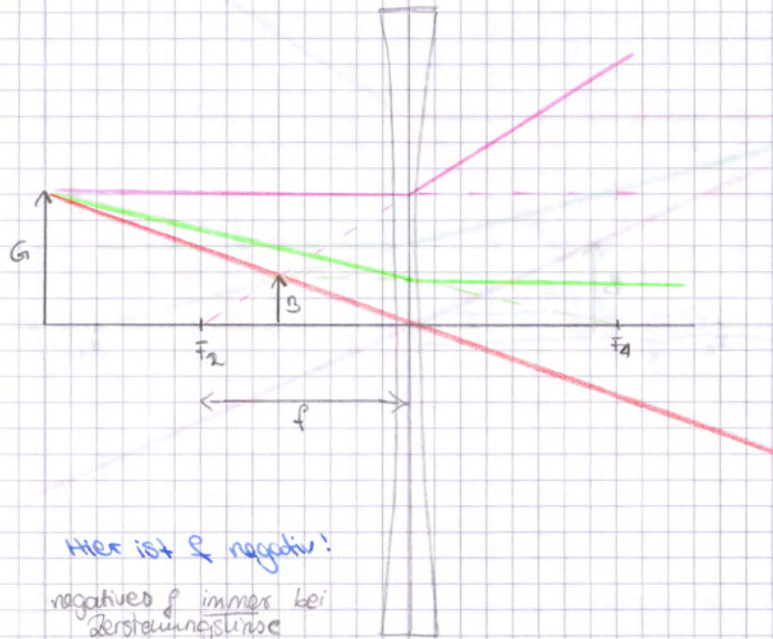


Beugung die Gitterunterteilung  
 werden durch Verzerrung  
 besser sichtbar,  
 ebenfalls Farben, die vertikale  
 Verschmierung - weiß versch.  
 Dunkel + Hellstellen auf, Gitter  
 scheint oben + unten vervielfacht



Konstruktion zur Zerstreuungslinse

25.3.09



Hier ist  $f$  negativ!  
negatives  $f$  immer bei  
Zerstreuungslinse

wenn  $f$  positiv ist, handelt  
es sich um eine Sammellinse

$(2-1) \cdot (2-0) = 0$

$n = \frac{c}{v}$

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

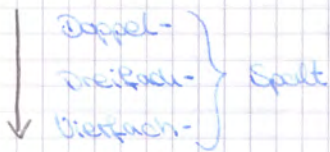
$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$   
 $\frac{1}{-10} = \frac{1}{-20} + \frac{1}{f_2}$   
 $\frac{1}{f_2} = \frac{1}{-10} + \frac{1}{20} = -\frac{2}{20} + \frac{1}{20} = -\frac{1}{20}$   
 $f_2 = -20$

⑤ Beugung am Mehrfachspalt

a, Mehrfachspalte mit einheitlichem Spaltabstand



3 Abtastungen im Streifen, Mitte war am hellsten



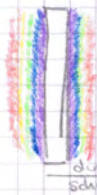
prinzipiell würde es zum  
Vierfachspalt heller,  
schärfer, kontrastreicher

b, Mehrfachspalte mit unterschiedlichen Spaltabständen  $d$   
(Transmissionsgitter)

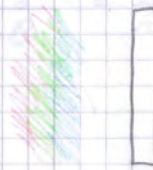
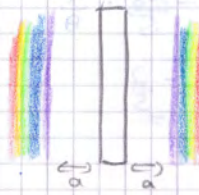
30/cm  
( $d = 0,125 \text{ mm}$ )

250/cm  
( $d = 0,004 \text{ mm}$ )

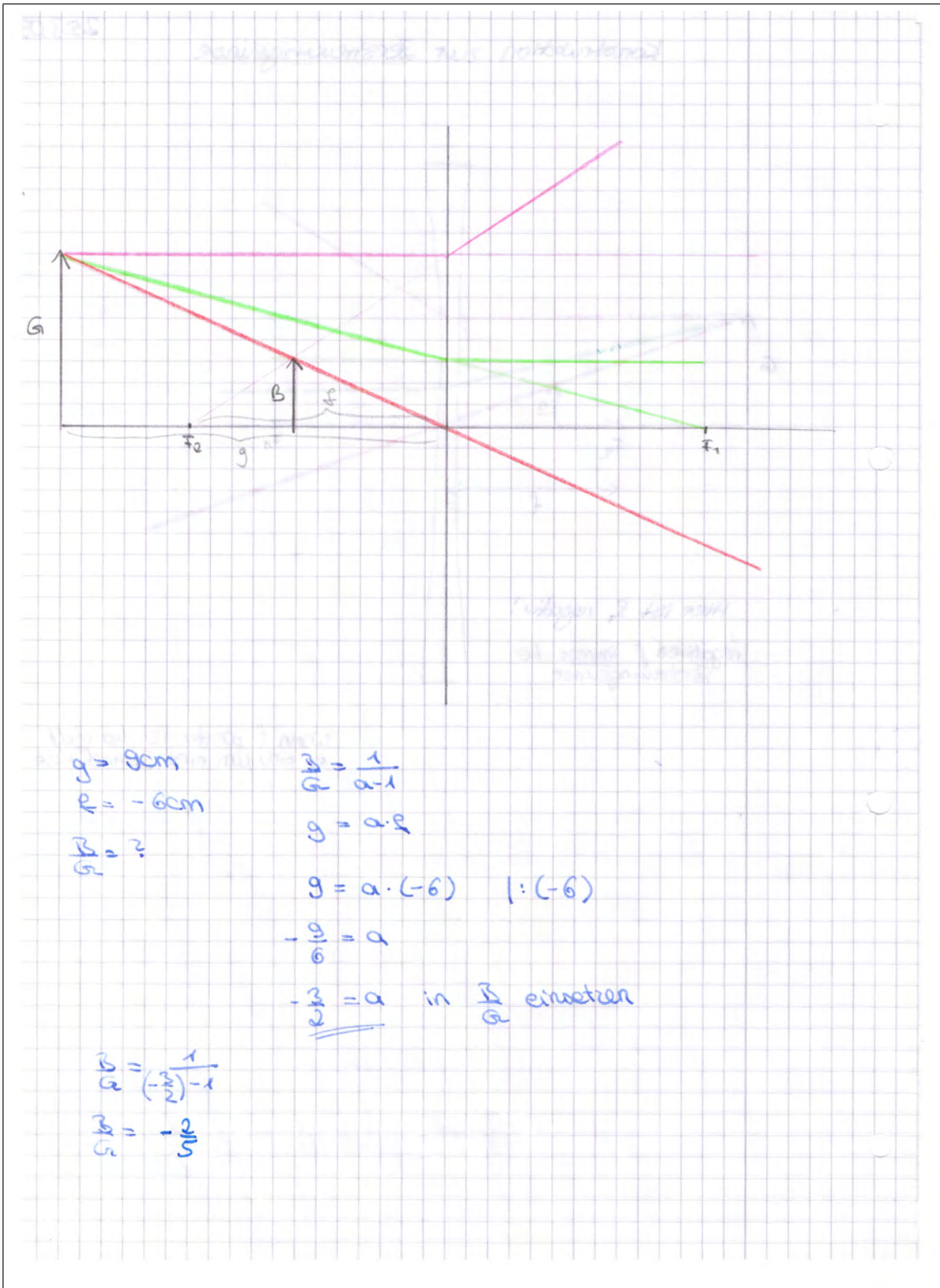
600/mm  
( $d = 0,0017 \text{ mm}$ )



dunkler  
schwächer →



Abstand  $a$  größer, Furchenabstand größer



oder:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

$$\frac{1}{5} = \frac{1}{g}$$

$$\frac{1}{-6} = \frac{1}{b} - \frac{1}{9} \quad |$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{-6\text{cm}} + \frac{1}{9\text{cm}}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{-3-2}{18\text{cm}}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{-5}{18\text{cm}}$$

$$b = -\frac{18}{5}\text{cm}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{-\frac{18}{5}\text{cm}}{9\text{cm}} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{1}$$

= -1/5

## Aufzeichnungen einer dritten Schülerin

d desi  $\frac{1}{10} = 0,1 = 10^{-1}$

c centi  $\frac{1}{100} = 0,01 = 10^{-2}$

m milli  $0,001 = 10^{-3}$

$\mu$  mikro  $= 10^{-6}$

n nano  $= 10^{-9}$

p pico  $= 10^{-12}$

$0,00\dots 01 = 10^{-x}$   
 $x-1$

### Das Huygen'sche Prinzip (1690)

- Licht breitet sich in Form einer räumlichen Welle aus
- jeder Punkt dieser Welle wird als Ausgangspunkt einer Elementarwelle (mit gleicher Geschwindigkeit & Frequenz) betrachtet
- die Einhüllende der Elementarwelle ergibt eine neue Wellenfront zu späterem Zeitpunkt

## Beobachtungen in der Wellenwanne

### a, Elementarwelle



### b, Mehrfachanregung

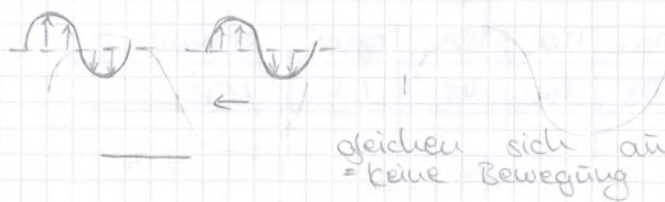


Wellenfront

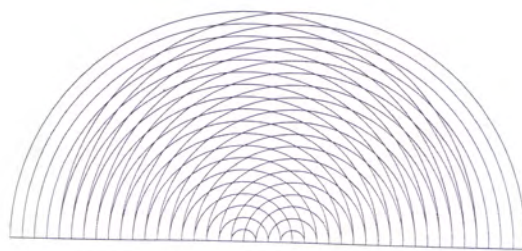
### c, Einfachspalt



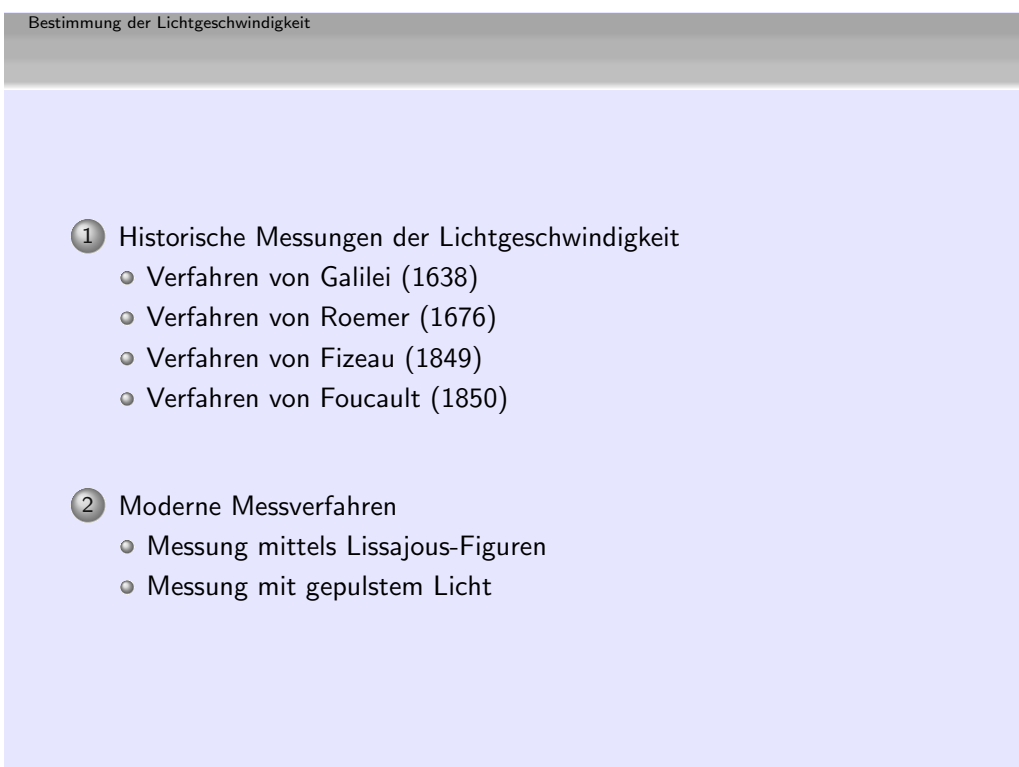
### di Doppelspalt



- treffen Wellenzüge aufeinander (gleiche Wellenlänge) werden die Amplituden addiert (konstruktiv - destruktiv), kann verdoppelt oder ausgeglichen werden, diese Überlagerung nennt man Interferenz



## 11.7 Einführende Präsentation zum Projekttag





Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Galilei (1638)

- Person mit Laterne deckt deren Licht auf
- zweite Person mit Laterne deckt ihres ebenfalls auf, sobald sie ersteres sieht
- erste Person nimmt Verzögerung wahr zwischen dem ersten Aufdecken und dem Sehen des anderen Lichts



**ABER:** Es war keine Verzögerung wahrzunehmen

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Roemer (1676)

## Astronomisches Verfahren

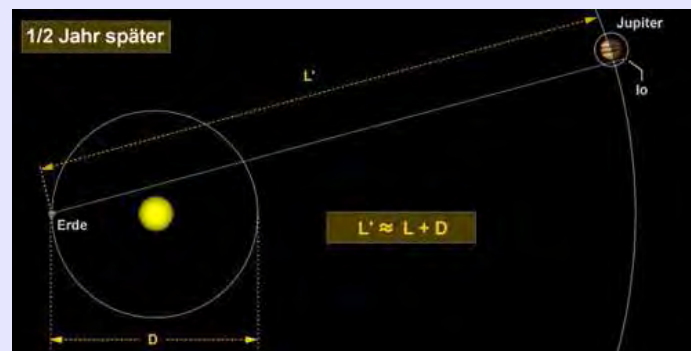
- Ermittlung der Umlaufzeit des Jupitermondes Io als Zeitspanne zweier aufeinanderfolgender Verfinsterungen
- Bei Opposition: Berechnung künftiger „Verfinsterungstermine“



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
 Verfahren von Roemer (1676)

## Astronomisches Verfahren

- Ein halbes Jahr später bei Konjunktionsstellung:  
Verfinsterungen um 22 Minuten verspätet
- Ein ganzes Jahr später bei Opposition:  
Verfinsterungen wieder „pünktlich“



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
 Verfahren von Roemer (1676)

Ole Christensen Roemer berechnet ersten groben Wert für die Lichtgeschwindigkeit:

Abstand Sonne - Erde : 141 000 000 *km*

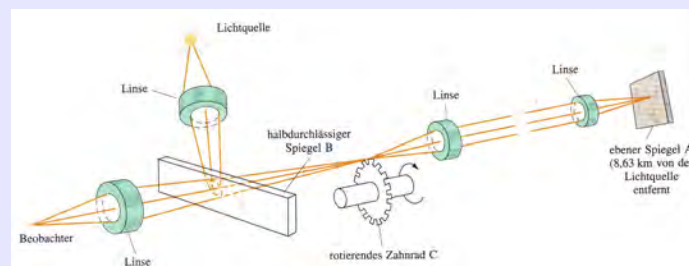
$D = 282\,000\,000\text{ km}$

$\Delta t = 1320\text{ s}$

$$\Rightarrow c = \frac{D}{\Delta t} = \frac{282\,000\,000\text{ km}}{1320\text{ s}} \approx 214\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Fizeau (1849)

- Zahnradmethode ist erstes terrestrisches Verfahren
- Licht wird auf die Zähne eines rotierenden Zahnrades fokussiert
- In Lückenstellung: Lichtbündel gelangt zu weit entferntem Spiegel, wird zurück reflektiert
- Beobachter hinter halbdurchlässigem Spiegel nimmt Lichtblitz wahr, wenn reflektierter Strahl wieder auf nächste Lücke trifft



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Fizeau (1849)

Berechnung der Lichtgeschwindigkeit nach Armand Fizeau:

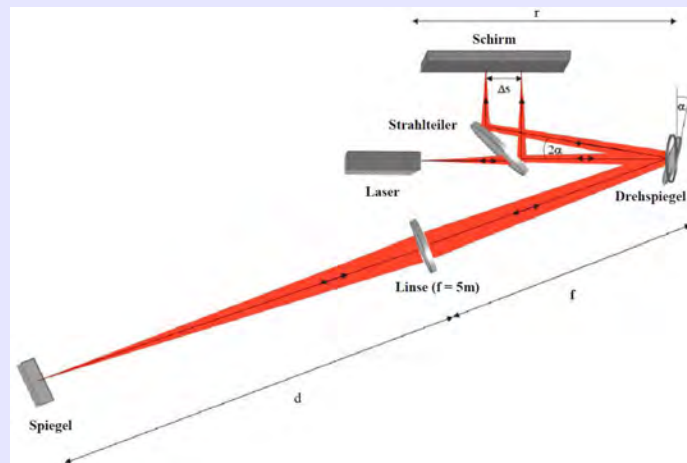
Anzahl der Zähne:	720
Zahnradrotation:	$25,3 \frac{U}{s}$
Abstand Zahnrad - Spiegel:	8,63 km
Zeitspanne für Hin- und Rücklauf:	$\Delta t = \frac{1 s}{25,3 U} \left( \frac{1}{720} U \right) = 5,49 \cdot 10^{-5} s$

$$\Rightarrow c = \frac{2 \cdot 8,63 \text{ km}}{5,49 \cdot 10^{-5} s} \approx 315\,000 \frac{\text{km}}{s}$$

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Foucault (1850)

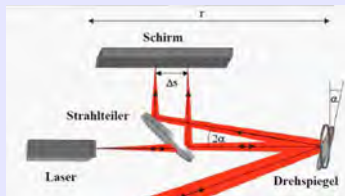
Verbesserung des Verfahrens durch Leon Foucault:

- Drehspiegel statt Zahnrad
- Abbildungsschirm ersetzt direkten Beobachter



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit  
Verfahren von Foucault (1850)

Berechnung der Lichtgeschwindigkeit mittels Drehspiegelmethode:



Drehung

in Zwischenzeit  $t$  bei Drehfrequenz  $\nu$ :

$$\alpha = 2\pi \cdot \nu \cdot t$$

Ablenkung des rücklaufenden Strahls:

$$\tan 2\alpha = \frac{\Delta s}{r}$$

Lichtgeschwindigkeit =  $\frac{\text{durchlaufene Strecke}}{\text{Zwischenzeit}}$

$$c = \frac{2 \cdot (d + f)}{t} = \frac{2 \cdot (d + f)}{\frac{\alpha}{2\pi \cdot \nu}} = \frac{4\pi \cdot \nu \cdot (d + f)}{\alpha}$$

Foucault's Ergebnis  $c_F = 298\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Moderne Messverfahren

### Heute:

Moderne Geräte (z.B. das Oszilloskop) ermöglichen feinste Zeitauflösung und damit auch auf relativ „kurzen“ Strecken eine Messung der Lichtgeschwindigkeit

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Moderne Messverfahren  
Messung mittels Lissajous-Figuren

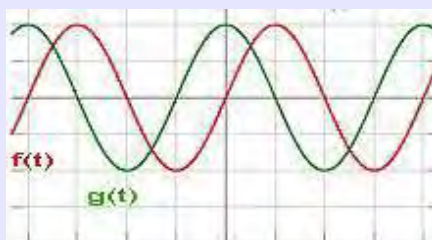
## Lissajous-Figuren

... entstehen bei einem  $f(t)$ -  $g(t)$ -Diagramm, wenn  $g$  und  $f$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  jeweils harmonische Schwingungen (Sinus-Kurven) sind, die eine rationales Frequenzverhältnis haben, d.h.

$$\frac{\nu_g}{\nu_f} \in \mathbb{Q}$$

Spezialfall:  $\nu_f = \nu_g$

Feste Phasenverschiebung zwischen  $g$  und  $f$  legt Lissajous-Figur fest!



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Moderne Messverfahren  
 Messung mittels Lissajous-Figuren

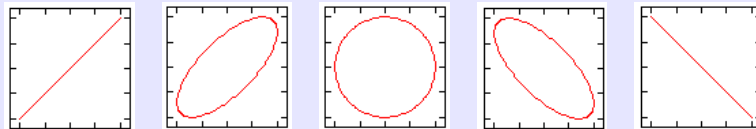
## Lissajous-Figuren

... entstehen bei einem  $f(t)$ -  $g(t)$ -Diagramm, wenn  $g$  und  $f$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  jeweils harmonische Schwingungen (Sinus-Kurven) sind, die ein rationales Frequenzverhältnis haben, d.h.

$$\frac{\nu_g}{\nu_f} \in \mathbb{Q}$$

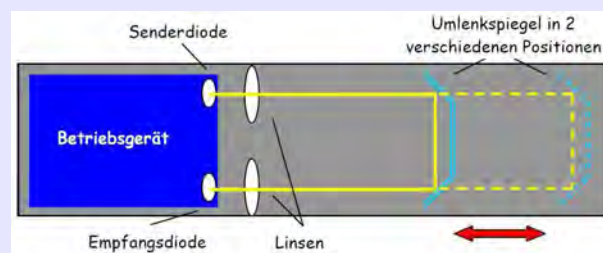
Spezialfall:  $\nu_f = \nu_g$

Feste Phasenverschiebung zwischen  $g$  und  $f$  legt Lissajous-Figur fest!



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Moderne Messverfahren  
 Messung mittels Lissajous-Figuren

Prinzip: Betrachtung der Phasenverschiebung von Ein- und Ausgangssignal



- intensitätsschwankendes Licht einer Senderdiode läuft über Umlenkspiegel in Empfängerdiode
- Eingangssignal wird am Oszilloskop gegen das Ausgangssignal dargestellt (→ Lissajous-Figuren)
- Ermitteln der Strecke  $\Delta s$  zwischen Phasenverschiebung  $\pi$  ( $180^\circ$ ) und 0

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Moderne Messverfahren  
 Messung mittels Lissajous-Figuren

Berechnung der Lichtgeschwindigkeit:

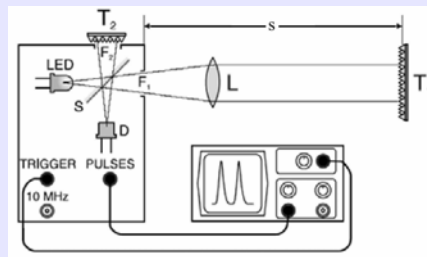
$$\text{Lichtgeschwindigkeit} = \frac{\text{Wegdifferenz}}{\text{Zeitdifferenz}}$$

$$c = \frac{2\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\Delta s}{\frac{1}{2}T} = 4 \cdot \frac{\Delta s}{T}$$

Periodendauer T der Intensitätsschwankung ist am Oszilloskop abzulesen

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
 Moderne Messverfahren  
 Messung mit gepulstem Licht

Prinzip: Messung der zeitlichen Verzögerung zweier Lichtimpulse bei bekanntem Wegunterschied



- Strahlteiler lässt Hälfte des Lichtimpulses durch, andere Hälfte wird reflektiert
- beide Teilimpulse durchlaufen Strecken zu verschiedenen Spiegeln hin und zurück
- erreichen zeitlich versetzt die Photodiode, welche Licht- in Spannungsimpulse umwandelt

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Moderne Messverfahren  
Messung mit gepulstem Licht

Berechnung der Lichtgeschwindigkeit:

$$c = \frac{2s}{\Delta t}$$

Messen von  $s$  und Ablesen von  $\Delta t$  liefert nötige Werte

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit  
Moderne Messverfahren  
Messung mit gepulstem Licht

Heute gültiger Wert:

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$



## Quellenverzeichnis

- [Ant09] <http://www.anthroposophie.net>
- [Bay08] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2008): Schule und Bildung in Bayern 2008 - Zahlen und Fakten (Bildungsstatistik Heft 50), Kastner AG, Wolnzach  
<http://www.km.bayern.de/km/schule/statistik/bildung/einzeln2008/index.shtml>
- [Bif09] <http://www.bifie.at/buch/322/9/6>
- [Buc06] Buck, P. ; von Mackensen, M. (2006): Naturphänomene erlebend verstehen, Aulis Verlag Deubner, Köln
- [Bun06] Bund der Freien Waldorfschulen in Österreich (Hrsg.; 2006): Freie Waldorfschulen im PISA-TEST, Bund der Freien Waldorfschulen in Österreich, Wien  
<http://www.waldorf-graz.at/veranst/pdf/pisa.pdf>
- [Bun07] Bund der Freien Waldorfschulen (Hrsg.; 2007): Was will Waldorfpädagogik? - Eine Informationsschrift zur Einführung, Bund der Freien Waldorfschulen, Stuttgart
- [Bun09] <http://www.waldorfschule.info>
- [Car81] Carlgren, F. (1981): Erziehung zur Freiheit, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main
- [Foc09] [http://www.focus.de/gesundheit/ratgeber/sehen/anatomic/ausgetrickst.did\\_12083.html](http://www.focus.de/gesundheit/ratgeber/sehen/anatomic/ausgetrickst.did_12083.html)
- [Gre09] <http://www.greier-greiner.at/hc/bsp/roemer.htm>
- [Kro09] [http://www.edertalschule.de/edertalschule/doc/bericht\\_bilaterale\\_schulleiterhospitation\\_lang.pdf](http://www.edertalschule.de/edertalschule/doc/bericht_bilaterale_schulleiterhospitation_lang.pdf)
- [Lis09] <http://de.wikipedia.org/wiki/Lissajous-Figur>

- [Mol07] Molz, A. (2007): Aufbau der Zahnradmethode von Fizeau und Einsatz im Schülerlabor - Wissenschaftliche Prüfungsarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien  
[http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/lehramt/Vortraege/Anleitung/Alexander\\_Molz\\_StEx.pdf](http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/lehramt/Vortraege/Anleitung/Alexander_Molz_StEx.pdf)
- [Oss09] <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~praktiku/Anleitung/41.pdf>
- [Pis09] [http://pisa.ipn.uni-kiel.de/PISA2003\\_E\\_Zusammenfassung.pdf](http://pisa.ipn.uni-kiel.de/PISA2003_E_Zusammenfassung.pdf)
- [Pur09] <http://www.panoptikum.net:80/optischetaeusungen>
- [Ran99] Randoll, D. (1999): Waldorfpädagogik auf dem Prüfstand, VWB - Verlag für Wissenschaft und Bildung, Berlin
- [Rud88] Rudolph, C. (1988): Waldorf-Erziehung, Luchterhand, Darmstadt
- [Sta09] <http://www.isb-gym8-lehrplan.de>
- [Ste69] Steiner, R. (1969): Freie Schule und Dreigliederung - Drei Aufsätze, 1. Auflage in dieser Zusammenstellung, Rudolf-Steiner-Nachlassverwaltung, Dornach/Schweiz
- [Tip00] Tipler, P. A. (2000): Physik, 3. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford
- [Vog09] <http://www.goethesfarbenlehre.de>
- [Wal08] Waldorfschulverein Würzburg (Hrsg.; 2008): Leben lernen, lernen leben - Eine Schule für unsere Zeit, Schneider Printmedien GmbH, Weidhausen  
<http://www.waldorfschule-wuerzburg.de>
- [Wen09] <http://www.waldorfschule-bs.de/pisa.html>

Alle Internetquellen beziehen sich auf das Aufrufdatum vom 19.06.2009

## Danksagung

Abschließend möchte ich mich herzlich bedanken bei...

- Herrn Prof. Dr. Trefzger für die Möglichkeit dieses doch eher unkonventionelle Thema für meine Zulassungsarbeit wählen zu können, für die gesamte Betreuung dieser Arbeit, die gute Beratung und das Beantworten zahlreicher und langer E-Mails
- Herrn Grün für die Bereitschaft während seiner Physikepoche hospitieren und unterrichten zu dürfen, für seine Hilfe und Beratung bei der Unterrichtsvorbereitung und für die vielen interessanten Gespräche über die „verrückten“ Dinge dieser Welt
- den Herren Moritz Lenz, Johannes Meisenzahl und Stefan Brust für die Betreuung der Stationen zur Lichtgeschwindigkeitsmessung am Projekttag
- Herrn Prof. Dr. Ossau für die Bereitstellung der Räumlichkeiten und Aufbauten des physikalischen Grundpraktikums
- meiner besseren Hälfte für die Unterstützung durch allmorgentlichen Kaffee während der „heißen“ Schreibphase
- meinem Bruder für seine schonungslose Kritik



## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit in allen Teilen selbständig gefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Diesen Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht. Zeichnungen und bildliche Darstellungen habe ich selbst gefertigt, sofern sie nicht mit einer Quellenangabe versehen sind.

Würzburg, den 15.09.2009, \_\_\_\_\_

Ziemek, Margarete