

Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Schule, Jugend und Berufsbildung
Amt für Schule

Wellen

Handreichung zum Physikunterricht in der Vorstufe

Fachreferent:	Werner Renz, Amt für Schule, S 13/21	
Erster Entwurf von:	Georg Baesler Manfred Eichhorn Rainer Menzel Erhard Meyer Joachim Reinhardt Hans-Peter Tietjen	H 5, Wirtschaftsgymnasium Gymnasium Rissen Charlotte-Paulsen-Gymnasium Institut für Lehrerfortbildung Gymnasium Billstedt Gymnasium Kaiser-Friedrich-Ufer
Überarbeitete Fassung:	Rainer Menzel Erhard Meyer	Charlotte-Paulsen-Gymnasium Institut für Lehrerfortbildung

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

das Amt für Schule überreicht Ihnen eine Handreichung zum Thema des zweiten Semesters im Physikunterricht der Vorstufe. Ein erster Entwurf wurde von einem Arbeitskreis am Institut für Lehrerfortbildung erstellt und ist möglicherweise in Ihrer Hand. Der Kollege Rainer Menzel hat diese Vorlage noch einmal überarbeitet und insbesondere hinsichtlich der graphischen Darstellungen in ein nahezu professionelles Format gebracht.

Die Handreichung beschreibt in detaillierter Weise den Unterrichtsgang des Semesterthemas „Wellen“. Eingebettet in die Hinweise zu den Unterrichtsstunden sind Anmerkungen zur historischen Entwicklung der Forschung. Neben der Beschreibung von Demonstrationsversuchen enthält jedes Kapitel Vorschläge für Aufgabenstellungen sowie deren Lösungen.

Ich bin sicher, daß die vorliegende Handreichung wertvolle Hinweise für die Planung und Durchführung Ihres Unterrichts enthält. Dem Kollegen Rainer Menzel danke ich für die geleistete außerordentlich zeitintensive Arbeit.

Werner Renz

Handreichungen zum Physikunterricht

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

„C I P“ - Computer im Physikunterricht
Loseblattsammlung zum Austauschen und Ergänzen

- Die Teillieferungen 1 - 3 liegen vor.
- 4. Teillieferung folgt im November 1996.

1. Auflage 1996

Herausgeber: Behörde für Schule, Jugend und Berufsbildung, Amt für Schule, Hamburg.

Druck: D&K Druck GmbH, Hamburg.

Alle Rechte vorbehalten. Jegliche Verwertung dieses Druckwerkes bedarf - soweit das Urheberrechtsgesetz nicht ausdrücklich Ausnahmen zuläßt - der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

Hamburger Schulen können die Handreichungen von der Beschaffungsstelle V 643-2 beziehen.

Anforderungen sind mit Z 3-Schein über die BSJB - S 601-2 - zu leiten.

Die Handreichung „WELLEN“ ist auch an der Beratungsstelle Physik am Institut für Lehrerfortbildung, Felix-Dahn-Str. 3, 20357 Hamburg, erhältlich.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorbemerkungen	3
Der Unterrichtsgang	5
1. Größen zur Beschreibung einer Welle	
1.1 Inhalte	6
1.2 Unterrichtsgang	6
1.3 Hinweise zu den Stunden	7
1.4 Demonstrationsversuche	14
1.5 Aufgabenbeispiele	19
Lösungen	27
2. Reflexion und Brechung	
2.1 Inhalte	33
2.2 Unterrichtsgang	33
2.3 Hinweise zu den Stunden	33
2.4 Demonstrationsversuche	39
2.5 Aufgabenbeispiele	42
Lösungen	46
3. Überlagerung von Wellen: Zweistrahlinterferenz	
3.1 Inhalte	50
3.2 Unterrichtsgang	50
3.3 Hinweise zu den Stunden	50
3.4 Demonstrationsversuche	63
3.5 Aufgabenbeispiele	68
Lösungen	73
4. Beugung und Interferenz	
4.1 Inhalte	78
4.2 Unterrichtsgang	78
4.3 Hinweise zu den Stunden	78
4.4 Demonstrationsversuche	87
4.5 Aufgabenbeispiele	90
Lösungen	93
5. Überlagerung von Wellen: Stehende Wellen	
5.1 Inhalte	97
5.2 Unterrichtsgang	97
5.3 Hinweise zu den Stunden	97
5.4 Demonstrationsversuche	108
5.5 Aufgabenbeispiele	111
Lösungen	115

Vorbemerkungen

Der Unterricht in der Vorstufe wendet sich an zwei unterschiedliche Gruppen von Schülerinnen und Schülern: „Einerseits müssen Schülerinnen und Schüler, die nach Ablauf der Vorstufe Physik nicht mehr weiter wählen, auf jeden Fall einen angemessenen Einblick in die Arbeits- und Denkweisen der Physik und in die Bedeutung dieser Disziplin für die Lebenswelt gewinnen können. Andererseits sollen die Schülerinnen und Schüler, die den Physikunterricht in der Studienstufe weiterführen, darüber hinaus eine genügend sichere Grundlage für ihre weitere Arbeit erhalten.“

(Lehrplan Physik für die gymnasiale Oberstufe, Hamburg 1990)

Vor diesem Hintergrund hält der Arbeitskreis das Thema „Wellen“ (neben dem Thema des ersten Semesterkurses „Mechanik des Massenpunktes“) für besonders geeignet.

Hinweise:

- ◆ Für das Thema „Wellen“ steht ein halbes Schuljahr zur Verfügung.
- ◆ Die Konzeption dieses Unterrichtsganges erfordert es, daß sich der Unterricht auf viele und vielfältige Experimente stützt.
- ◆ Auf eine ausführliche Behandlung der Schwingungen wird verzichtet. Die Schwingung wird qualitativ als zeitlich periodischer Vorgang beschrieben. An eine Beschreibung der harmonischen Schwingung mit Hilfe der Schwingungsgleichung ist nicht gedacht.
- ◆ Die doppelte Periodizität der Welle wird ohne mathematische Beschreibung durch die Wellengleichung behandelt.
- ◆ Der Begriff „Phase“ wird nicht definiert. Die Sonderfälle der Gleich- und Gegenphasigkeit werden anschaulich beschrieben.
- ◆ Das Huygenssche Prinzip wird nicht behandelt. Bei der Beugung kann man sich auf Experimente beschränken, bei denen die Wellenerreger als punktförmig betrachtet werden können.
- ◆ „Transversal- und Longitudinalwellen“ können erwähnt werden. Man kann sich mit Andeutungen bei der Behandlung der Schallwellen begnügen. Eine vertiefte Behandlung sollte bei der Bearbeitung des Themas „Polarisation“ in der Studienstufe erfolgen.
- ◆ Das Thema „Doppler-Effekt“ sollte ebenfalls erst in der Studienstufe behandelt werden.
- ◆ Im Lehrplan werden die Zentimeterwellen erwähnt. Der Arbeitskreis ist der Meinung, daß neben der Behandlung der Ultraschall- und Lichtwellen auf diesen zusätzlichen Phänomenbereich verzichtet werden kann.

Im vorliegenden Unterrichtsgang steht das phänomenologische Vorgehen im Vordergrund: Gleiche Phänomene werden parallel an mehreren Wellenerscheinungen (Seil-, Wasser-, Schall- und Ultraschall-, Lichtwellen) gezeigt.

Es werden vielfältige Experimente gezeigt. Versuchsbeschreibungen, die sprachliche Formulierung physikalischer Aussagen und die graphische Darstellung stehen gegenüber der mathematischen Beschreibung im Vordergrund. Trotzdem werden eine ganze Reihe von mathematischen Anforderungen gestellt.

An vielen Stellen im Unterrichtsgang bietet es sich an, auf historische Zusammenhänge und Entwicklungen hinzuweisen. Die historischen Berichte sind auch für Kurzreferate von Schülerinnen und Schülern geeignet.

Der vorliegende Unterrichtsgang gliedert sich in fünf Kapitel:

1. Größen zur Beschreibung einer Welle
2. Reflexion und Brechung
3. Überlagerung von Wellen:
Zweistrahlinterferenz
4. Beugung und Interferenz
5. Überlagerung von Wellen: stehende Wellen

Jedes Kapitel ist unterteilt in:

- ◆ Inhalte und Bemerkungen
Die Bemerkungen zeigen, welche Schwerpunkte bei der Erarbeitung des Kapitels zugrunde lagen.
- ◆ Unterrichtsgang
- ◆ Hinweise zu den Stunden
Die Vorschläge zur Durchführung der einzelnen Stunden verstehen sich - wie der gesamte Unterrichtsgang -

als ein möglicher Weg. Die Hinweise auf historische Zusammenhänge und Entwicklungen sind als Anregungen für die Lehrerinnen und Lehrer gedacht, sie erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

- ◆ Demonstrationsversuche
Die Sammlung und Beschreibung von Demonstrationsversuchen soll Tips zum Aufbau und zur Durchführung geben. Sie soll dazu anregen, vielfältige Experimente zu zeigen. Es ist aber nicht daran gedacht, daß alle beschriebenen Versuche vorgeführt werden.
- ◆ Aufgabenbeispiele mit Lösungen
Die Aufgabensammlungen sind recht umfangreich. Die Aufgabenbeispiele sind im Schwierigkeitsgrad sehr unterschiedlich.
Keinesfalls ist daran gedacht, daß alle Aufgaben im Unterricht oder in Klausuren bearbeitet werden sollen. Das Angebot soll die Möglichkeit zu einer individuellen Auswahl bieten.

Der **Unterrichtsgang** des Semesterkurses „Wellen“

1. Größen zur Beschreibung einer Welle

1. Std.: Wellenarten, Begriffe, verbale Beschreibung
2. Std.: Schwingung am festen Ort, Momentbild; $c = \frac{\lambda}{T}$
3. Std.: Arbeiten mit Diagrammen; Zusammenhang $f = \frac{1}{T}$
4. Std.: Wellen in der Wellenwanne, Abschätzen von c und λ
5. Std.: Schallgeschwindigkeit in Luft, Messung der Laufzeit
6. Std.: Schallgeschwindigkeit in Luft, Messung der Wellenlänge
7. Std.: Lichtgeschwindigkeit, historische Meßverfahren
8. Std.: Messung der Lichtgeschwindigkeit, Drehspiegel

2. Reflexion und Brechung

9. Std.: Reflexionsgesetz; Echolot
10. Std.: Brechungsgesetz, Brechungszahl; Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien
11. Std.: Totalreflexion; Lichtleiter

3. Überlagerung von Wellen: Zweistrahlinterferenz

12. Std.: Interferenzrohr
13. Std.: Interferenz von Wasserwellen
14. Std.: Interferenz von Schall-, Ultraschallwellen
15. Std.: Bestimmung der Wellenlänge aus Interferenzversuchen
16. Std.: Interferenz beim Biprisma
17. Std.: Abschätzen der Wellenlänge von sichtbarem Licht

4. Beugung und Interferenz

18. Std.: Phänomen der Beugung
19. Std.: Beugung und Interferenz von gebeugten Wellen
20. Std.: Doppelspalt-Versuch mit Licht
21. Std.: Gitter-Versuche mit Licht
22. Std.: Spektren

5. Überlagerung von Wellen: stehende Wellen

23. Std.: Phänomen der stehenden Welle, Beschreibung
24. Std.: Erklärung für das Entstehen der stehenden Welle
25. Std.: Bestimmung von Wellenlängen
26. Std.: Anwendungen der stehenden Welle

1. Größen zur Beschreibung einer Welle

1.1 Inhalte

- Überblick über verschiedene Wellenarten (mechanische und akustische Wellen, Radiowellen und Licht)
Ausbreitungsmuster: Quelle - Übertragung - Empfänger
- Variablen: Zeit, Ort, Auslenkung
- weitere Größen: Schwingungsdauer, Frequenz, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge, Amplitude
- Schwingungsdiagramme für verschiedene Orte der Welle
- Momentbilder der Welle für verschiedene Zeitpunkte
- Welle als doppelt periodischer Vorgang
- Zusammenhänge: $f = \frac{1}{T}$ und $c = f \cdot \lambda$
- Methoden zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Schallgeschwindigkeit in Luft
- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Bemerkungen:

Die Inhalte sind in ihrem Schwierigkeitsgrad nicht gleichgewichtig. Die doppelte Periodizität der Welle und Aufgaben hierzu müssen sehr sorgfältig behandelt werden: Vorgegebene Diagramme (und Abfolgen von Diagrammen) sind zu beschreiben und zu interpretieren, Schwingungen an einem Ort und Momentbilder der untersuchten Welle sind zu skizzieren. Die Behandlung der Methoden zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird auch einen großen Teil der Unterrichtszeit in Anspruch nehmen. Die genaue Beobachtung und Beschreibung der vorgeführten Experimente stellt eine besondere Anforderung dar.

1.2 Unterrichtsgang

1. Stunde: Wellenarten;
Begriffe: Schwingungsdauer, Frequenz, Amplitude, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge; verbale Beschreibung einer Welle
2. Stunde: Diagramme: Schwingung am festen Ort, Momentbild einer Welle;
Zusammenhang: $c = \frac{\lambda}{T}$
3. Stunde: Arbeiten mit Diagrammen; Zusammenhang: $f = \frac{1}{T}$
4. Stunde: Ausbreitung von Wasserwellen in der Wellenwanne,
Abschätzen von c und λ
5. Stunde: Schallgeschwindigkeit in Luft, 1. Verfahren: Messung der Laufzeit;
Schallgeschwindigkeit in einem festen Stoff
6. Stunde: Schallgeschwindigkeit in Luft, 2. Verfahren: Messung der Wellenlänge

7. Stunde: Messung der Lichtgeschwindigkeit, verschiedene historische Meßverfahren
8. Stunde: Messung der Lichtgeschwindigkeit, Abschätzung von c nach der Drehspiegelmethode

1.3 Hinweise zu den Stunden

1. Stunde:

Mögliche Hausaufgaben zu dieser 1. Stunde: Welche verschiedenen Wellenerscheinungen gibt es? Was ist eine Welle? (Hilfe: Lexika, Physikbücher)

Im Klassengespräch werden zunächst Phänomene und Begriffe gesammelt und geordnet, die von den Schülerinnen und Schülern genannt werden. In dieser Zusammenstellung sollten die verschiedenartigen Wellenerscheinungen wie Seil-, Wasser-, Schall-, Radio- und Lichtwellen enthalten sein (die Schülerbeiträge müssen eventuell vom Lehrer ergänzt werden). Andere Begriffe zur Beschreibung einer Welle (Wellenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenform usw.) werden gegebenenfalls auch gesammelt und zunächst zurückgestellt.

Für die genannten Wellenerscheinungen wird das gemeinsame Ausbreitungsmuster diskutiert: Quelle - Übertragung - Empfänger.

Falls die oben angegebene Hausaufgabe gestellt wurde, wird die Definition der Welle von den Schülerinnen und Schülern formuliert werden: Die Welle ist ein räumlich und zeitlich periodischer Vorgang, bei dem Energie transportiert wird, ohne daß gleichzeitig auch ein Massetransport stattfindet (z. B. Schülerduden „Die Physik“).

Diese Definition einer Welle - vor allem die doppelte Periodizität - ist jetzt anhand verschiedener Wellenerscheinungen zu interpretieren. Seilwellen und Transversalwellen auf einer langen Feder können zur Veranschaulichung benutzt werden.

Hierbei werden die Größen, die zur Beschreibung einer Welle dienen, erarbeitet: Zeit, Ort und Auslenkung; Wellenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Amplitude. Eine Serie von Momentaufnahmen einer Welle wird beschrieben. Hieran werden anschließend Schwingungszustände an einem festen Ort in Abhängigkeit von der Zeit abgelesen. An eine ausführliche, gar mathematische Behandlung des Themas „Schwingungen“ ist in diesem Unterrichtsgang nicht gedacht. Es soll nur für einen beliebigen Ort der Welle die zeitliche Periodizität herausgearbeitet werden. Die Begriffe Schwingungsdauer und Frequenz werden eingeführt.

Hausaufgabe: A 1.1

Weitere Anmerkungen:

- ◆ Falls die Begriffe Longitudinal- und Transversalwelle von den Schülerinnen und Schülern genannt werden, lassen sich die Unterschiede mit Hilfe der langen Feder schnell klären. Diese Begriffe werden nicht weiter problematisiert, da über Polarisation nicht weiter gesprochen werden soll.
- ◆ Falls die angegebene Hausaufgabe nicht gestellt wurde, läßt sich diese Stunde auch mit der Untersuchung von Seilwellen oder Transversalwellen auf der langen Feder beginnen.

- ◆ Eine weitere Möglichkeit für den Einstieg besteht darin, eine Welle von einer Reihe von Schülerinnen und Schülern „produzieren“ zu lassen („Mexikowelle“). Jede Schülerin und jeder Schüler bewegt ein Blatt Papier senkrecht auf und ab. Im Zusammenspiel aller Glieder der Reihe entsteht eine Welle. Dieses Vorgehen erfordert bereitwillige Mitarbeit aller. Besonders günstig ist es, wenn Videokamera und Monitor eingesetzt werden können, damit die Gruppe stets den Gesamteindruck der Welle vor Augen hat.

2. Stunde:

Falls in diesen ersten Stunden die vorgeschlagenen Hausaufgaben gestellt werden, wird für eine ausführliche Besprechung ein großer Teil der Unterrichtszeit verwendet werden müssen. Ausgehend von Aufgabe A 1.1 läßt sich bei der Interpretation der Momentaufnahmen die Darstellung der Schwingung an einem festen Ort entwickeln. Im Zusammenhang mit der doppelten Periodizität der Welle läßt sich der folgende Zusammenhang erarbeiten:

Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich Wellenlänge durch Schwingungsdauer: $c = \frac{\lambda}{T}$.

Mit Hilfe einer Wellenmaschine werden die Zusammenhänge noch einmal verdeutlicht. Falls ein solches Gerät nicht zur Verfügung steht, läßt sich ein Modell leicht anfertigen (vgl. D 1.1). Gezeigt werden die Schwingung eines Teilchens und die gesamte Welle. Die Größen zur Beschreibung der Welle lassen sich für die Wellenmaschine (bzw. für das Modell) abschätzen: Auslenkung, Amplitude, Schwingungsdauer, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge.

Hausaufgabe: A 1.2

3. Stunde:

Besprechung der Hausaufgabe.

Für das Verständnis des Zusammenhanges zwischen f und T genügt eigentlich die Mitteilung der Gleichung: $f = \frac{1}{T}$. Erfahrungsgemäß ist es aber sinnvoll, diesen Zusammenhang in einigen Beispielen näher zu besprechen. Dazu sollten Beispiele gewählt werden, bei denen einmal die Schwingungsdauer, dann die Frequenz die geeignetere Größe ist.

1. Eine Glühlampe wird mit Hilfe eines Sinusgenerators ($f = 0,1$ Hz) betrieben. Der Versuch wird beschrieben. Ein Amperemeter wird in den Stromkreis, ein Voltmeter wird parallel zur Lampe geschaltet. Die Schwingungsdauer wird mit der Handstoppuhr gemessen. Aus der Schwingungsdauer wird die Frequenz berechnet. Parallel zum Voltmeter wird ein Oszilloskop (ohne zeitliche Ablenkung) geschaltet. (Das Oszilloskop wird hier eingeführt, da es bei späteren Versuchen häufig benötigt wird.) Die Frequenz wird erhöht, die Drehspulinstrumente und das Oszilloskop werden beobachtet. Am Oszilloskop wird jetzt zusätzlich eine zeitliche Ablenkung eingestellt. Es muß klargelegt werden, daß mit dem Oszilloskop ein Auslenkung-Zeit-Diagramm (eine Schwingung) und nicht das Bild einer Welle dargestellt wird.
2. Technische Wechselfrequenz. Die Frequenz wird mitgeteilt, die Schwingungsdauer wird berechnet. Mit Hilfe des Oszilloskops wird die Schwingung dargestellt.

3. Kammerton a. Die Frequenz von 440 Hz wird mitgeteilt. Die Schwingung einer Stimmgabel kann mit Hilfe von Mikrofon und Oszilloskop dargestellt werden. Eigentlich zeigt das Oszilloskop die Schwingung der Mikrofonmembran. Oder man zeigt die Schwingung des Senders, wenn man einen Lautsprecher mit Hilfe eines Sinusgenerators betreibt und die Schwingung des Senders mit dem Oszilloskop darstellt. In jedem Fall zeigt das Oszilloskop eine Schwingung, nicht die Welle, die sich von der Stimmgabel zum Mikrofon bzw. vom Lautsprecher zum Ohr ausbreitet.

Sehr eindrucksvoll ist es, wenn bei den hier beschriebenen Experimenten Schwingungsdauer und Frequenz gleichzeitig angezeigt werden. Das läßt sich mit Hilfe eines Computers erreichen (vgl. D 1.2).

Hausaufgabe: A 1.3

4. Stunde:

Ausführliche Besprechung der Hausaufgabe.

Die Interpretation und die Herstellung von $s_y(t)$ - und $s_y(s_x)$ -Diagrammen sind ein Hauptthema dieser ersten Stunden und müssen ausführlich behandelt werden.

Im folgenden werden die eingeführten Begriffe bei der Behandlung neuer Wellenphänomene wiederholt und vertieft.

In dieser Stunde werden Wasserwellen untersucht. In der Wellenwanne werden parallele Wellenfronten (keine Kreiswellen) erzeugt. Bei störenden Reflexionen empfiehlt es sich, nur kurze Wellenzüge zu untersuchen.

Das Entstehen und die Ausbreitung der Wellen wird zunächst qualitativ beschrieben. Die allgemeine Definition der Welle wird wiederholt (räumlich und zeitlich periodischer Vorgang, bei dem Energie, aber keine Masse transportiert wird).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wasserwellen wird als Quotient aus Strecke und Zeit abgeschätzt (Voraussetzung: gleichförmige Bewegung). Der Zusammenhang $c = f \cdot \lambda$ wird diskutiert. Hierzu wird die Frequenz verändert und die Änderung der Wellenlänge beobachtet.

Hausaufgabe: Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserwellen, z.B. in der Badewanne. Dabei genügt es, die richtige Größenordnung zu ermitteln.

Bemerkungen (nur für Lehrerinnen und Lehrer gedacht):

- ◆ Die Theorie für Wasserwellen ist recht kompliziert.
(vgl.: Gerthsen-Kneser-Vogel, Springer-Verlag 1977, Abschnitt 4.5
Pohl, Springer-Verlag 1962, erster Band, §§ 134 und 135)
- ◆ Für die Phasengeschwindigkeit von Wasserwellen gilt bei genügender Wassertiefe:
(*) $c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda}}$ (σ -spezifische Oberflächenenergie, ρ -Dichte der Flüssigkeit).

Werden die Wellen im wesentlichen durch die Schwerkraft beeinflusst, spricht man von Schwerewellen. Der erste Summand in (*) überwiegt dann: $c \approx \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}}$. Wenn wie hier die Phasengeschwindigkeit mit der Wellenlänge zunimmt, handelt es sich um „normale Dispersion“.

Werden die Wellen im wesentlichen durch Kapillarkräfte beeinflusst (relativ kurze Wellen), so spricht man von Kapillarwellen. Der zweite Summand in (*) überwiegt:

$c \approx \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda}}$. Kapillarwellen haben „anomale Dispersion“.

Bei geringer Wassertiefe $h \ll \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot \pi}}$ ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserwellen unabhängig von λ . Hier gilt: $c = \sqrt{g \cdot h}$. Man spricht von Flachwasserwellen. Diese Wellen zeigen keine Dispersion.

Die verschiedenen Wellenarten sind gegeneinander nicht klar abzugrenzen.

- ◆ Die Wellen in der schulüblichen Wellenwanne zeigen Eigenschaften von Kapillarwellen (anomale Dispersion) und von Flachwasserwellen (die Geschwindigkeit hängt von der Wassertiefe ab (Brechung)).
- ◆ Die Wellen in der Badewanne können (je nach Wellenlänge und Wassertiefe) Schwerewellen sein.
- ◆ Die „Tsunamis“ (Wellen im Pazifik, die z.B. durch Erdbeben ausgelöst werden) sind Flachwasserwellen. Eine Wassertiefe von 5 km ist klein gegenüber einer Wellenlänge von etwa 100 km. Die Geschwindigkeit dieser Wellen hängt nur von der Wassertiefe ab.
- ◆ Bei Wellen mit normaler oder anomaler Dispersion sind Gruppen- und Phasengeschwindigkeit zu unterscheiden: $c_{gr} = c - \lambda \cdot \frac{dc}{d\lambda}$.

Bei Schwerewellen (mit $c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}}$) gilt: $c_{gr} = 0,5 \cdot c$.

Bei Kapillarwellen (mit $c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda}}$) gilt: $c_{gr} = 1,5 \cdot c$.

Bei Flachwasserwellen gilt: $c_{gr} = c$.

- ◆ Wegen all dieser Unbestimmtheiten läßt sich für die Geschwindigkeitsmessung in der Hausaufgabe kein eindeutiger Wert erwarten. Wichtig sind hier vor allem das Meßprinzip und die Größenordnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

5. Stunde:

Besprechung der Hausaufgabe (Beschreibung der Versuchsdurchführung, Vergleich der Ergebnisse; erwartet werden Ergebnisse von etwa $20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$).

Eine Diskussion über die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Starterklappe und Handstoppuhr macht das Meßprinzip deutlich. Von den großen relativen Fehlern bei einer solchen Zeitmessung können sich die Schülerinnen und Schüler leicht überzeugen, wenn sie die Zeit zwischen zwei schnell aufeinanderfolgenden Schallsignalen mit der Handstoppuhr bestimmen. Über die Problematik der Zeitmessung bei der Leichtathletik kann diskutiert werden (vgl. Aufgaben A 1.9 und A 1.10).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Knalls (zwei Stativstangen) läßt sich mit zwei Mikrofonen und Kurzzeitmesser bestimmen. Mehrfache Zeitmessung für verschiedene Strecken liefert gute Mittelwerte und den Nachweis der Gleichförmigkeit der Schallausbreitung (vgl. D 1.3).

Daß die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängt, kann mitgeteilt werden. (vgl. Aufgabe A 1.11).

Wird der Knall über ein Schnurtelefon zum zweiten Mikrofon übertragen, so ergibt sich deutlich eine kleinere Laufzeit. Einige Schallgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Stoffen werden genannt.

6. Stunde:

Ein Lautsprecher wird mit Hilfe eines Sinusgenerators betrieben. Ein Oszilloskop zeigt die Betriebsspannung am Lautsprecher und damit die Schwingung der Lautsprechermembran. Ein zusätzliches Mikrofon empfängt den Sinuston. Das Oszilloskop zeigt die Spannung am Mikrofon und damit die Schwingung der Mikrofonmembran.

Es muß klar sein, daß das Oszilloskop nur Schwingungen an bestimmten Orten registriert.

Wenn der Versuchsaufbau prinzipiell verstanden ist, sollte man zu Ultraschall übergehen. Man arbeitet dann mit kleineren, für die Versuchsdurchführung günstigeren Wellenlängen und vermeidet den unangenehmen Ton.

Die Wellenlängenmessung läßt sich mit Hilfe eines Zweikanal-Oszilloskops durch Vergleich der Schwingungsbilder für Lautsprecher und Mikrofon oder durch Vergleich der Schwingungsbilder für zwei Mikrofone durchführen (vgl. D 1.4). Vor der eigentlichen Wellenlängenmessung werden zunächst qualitativ die Änderungen besprochen, die sich beim Verschieben eines Mikrofons ergeben. Falls die Frequenz der Ultraschallwellen nicht am Sinusgenerator abgelesen werden kann, wird sie gemessen (vgl. D 1.2).

Aus einer Wellenlängenmessung ergibt sich bei bekannter Frequenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen.

7. Stunde:

Messung der Lichtgeschwindigkeit, verschiedene historische Meßverfahren.

Galilei (1564 - 1642) macht den ersten Vorschlag zur experimentellen Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit: Zwei Beobachter A und B stehen mit Laternen in einem bestimmten Abstand voneinander. A deckt seine Laterne ab. Wenn B das sieht, deckt er seine Laterne ab. A mißt die Zeit, bis er diesen Vorgang sieht. Bei einer Entfernung von weniger als einer Meile konnte keine Zeitdifferenz festgestellt werden. Galilei schlug vor, die Entfernung auf 8 Meilen bis 10 Meilen zu erhöhen und mit Fernrohren zu arbeiten. Auch dieser Versuch mißlang (Discorsi, Erster Tag).

Römer (1644 - 1710) gelang 1675 die erste Messung der Lichtgeschwindigkeit. Er bestimmte die Umlaufzeit des Jupitermondes Io (etwa 42,5 h), dem innersten der schon von Galilei entdeckten vier großen Jupitermonde, und erhielt meßbare Abweichungen je nach Bewegung der Erde auf der Erdbahn. Eine Deutung der Abweichungen führte zur Abschätzung der Lichtgeschwindigkeit.

Zur Erklärung in der Schule ist es sinnvoll, sich vorzustellen, daß der Jupiter alle 42,5 h ein Lichtsignal aussendet. Ein Lichtsignal braucht bis zur Erde eine bestimmte Zeit. Wenn sich die Erde in den nächsten 42,5 h um $4,50 \cdot 10^6$ km weiter vom Jupiter ent-

fernt, braucht das nächste Lichtsignal vom Jupiter bis zur Erde 15 s länger. Daraus ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit (vgl. auch Aufgabe A 1.19).

Weitere Anmerkungen:

- ◆ Die Entdeckung Römers ist eine Zufallsentdeckung. Eigentlich wollte er die regelmäßigen Verfinsterungen des Jupitermondes als „Uhr“ benutzen. Den unterschiedlichen Gang dieser „Uhr“ erklärte Römer durch die endliche Lichtgeschwindigkeit.
- ◆ Römer hat nicht die Lichtgeschwindigkeit bestimmt. Er hat auch nicht die Zeitdifferenzen bei der Messung einer Umlaufzeit des Mondes bestimmt. Um eine Voraussage über längere Zeit machen zu können, hat er die Summe aller Zeitverschiebungen während eines halben Jahres bestimmt. Damit hatte er die Laufzeit des Lichtes für den Erdbahndurchmesser ermittelt.
- ◆ Mit dem Erdbahndurchmesser von $299 \cdot 10^6$ km und der von Römer bestimmten Zeit von 22 min hätte sich für die Lichtgeschwindigkeit der Wert von $2,3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergeben.
- ◆ Literaturhinweis: „Praxis der Naturwissenschaften, Physik“, Heft 4, 1988, S. 16-18. Hier sind unter anderem auch die Fakten zusammengestellt, die die Messungen und die Auswertung nach Römers Methode erschweren.

Bahndaten:

	Erde	Jupiter	Io
Bahnmittelpunkt	Sonne	Sonne	Jupiter
Bahnradius	$149,6 \cdot 10^6$ km	$777,8 \cdot 10^6$ km	$0,422 \cdot 10^6$ km
Umlaufzeit	1 a	11,82 a	42 h 28,6 min

Bradley (1692 - 1762) erklärte 1728 die Aberration des Lichtes. Aus der Bahngeschwindigkeit v der Erde und dem für die Aberration gemessenen Winkel α von 20,5 Bogensekunden ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit c nach der Gleichung $\tan \alpha = \frac{v}{c}$.

Literaturhinweise:

Sexl, Raab, Streeruwitz „Der Weg zur modernen Physik“, Band 2.

Höfling „Physik“, Band II, Teil 2; Kuhn „Physik“, Band III D (Schwingungen und Wellen).

Will man nach Galileis Vorschlag, die Lichtgeschwindigkeit als Quotienten aus zurückgelegter Strecke und benötigter Zeit zu ermitteln, aufgreifen, so muß man entweder die Strecke sehr groß wählen (Römer) oder man muß die Zeitmessung verbessern (Fizeau, Foucault).

Fizeau (1819 - 1896) gelang 1849 als erstem die Messung der Lichtgeschwindigkeit auf der Erde. Zur Diskussion des Meßverfahrens ist eine möglichst einfache Versuchsskizze zu empfehlen (siehe: Sexl, Raab, Streeruwitz „Der Weg zur modernen Physik“, 1980, Band 2, Seite 65). Fizeau benutzte als Lichtquelle eine Öllampe, zum Antrieb des Zahnrades eine Dampfmaschine; er verwendete Fernrohre an beiden Enden der etwa 9 km langen Strecke. Es sollte hervorgehoben werden, daß der Versuchsaufbau sehr große Präzision erforderte:

Der Spiegel mußte dabei so justiert werden, daß der Lichtstrahl nach einem Rückweg von etwa 9 km genau wieder die Lücke im Zahnrad traf.

Die Berechnung des Weges ist einfach: $2 \cdot 8633 \text{ m} = 17266 \text{ m}$. Die Berechnung der Laufzeit macht vielleicht einige Schwierigkeiten:

Bei 720 Zähnen und einer Frequenz von 12,6 Hz hat sich das Zahnrad in der Zeit Δt um einen halben Zahn weitergedreht: $\Delta t = \frac{1 \text{ s}}{12,6} : (2 \cdot 720) = 5,51 \cdot 10^{-5} \text{ s}$.

Für die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich nach diesen Werten:

$$c = \frac{17266 \text{ m}}{5,51 \cdot 10^{-5} \text{ s}} = 3,13 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

8. Stunde:

Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode.

Foucault (1819 - 1868) benutzte 1850 einen Drehspiegel, der von einer Luftdruckturbinen angetrieben wurde. Die Frequenz ermittelte er auf akustischem Wege (Ton bei der Rotation). Er konnte die Lichtgeschwindigkeit auf einer Strecke von 1 m messen. Damit wurde es möglich, die Lichtgeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien zu bestimmen.

In der Schule genügt es, eine Abschätzung für c vorzunehmen. Das Meßprinzip sollte geklärt werden. Wie bei der Zahnradmethode nach Fizeau geht es auch bei der Drehspiegelmethode nach Foucault darum, die sehr kurze Zeit zu messen (hier etwa $0,1 \mu\text{s}$!).

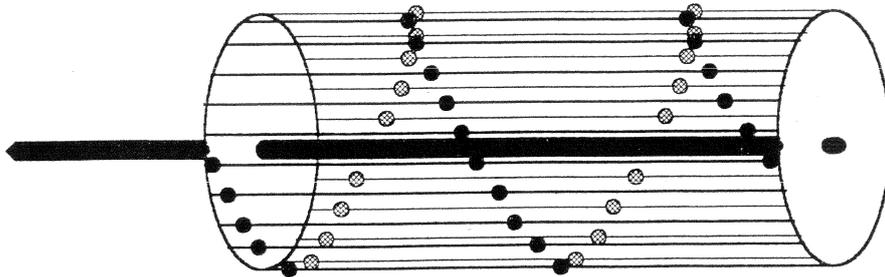
Die Streckenmessung ist einfach: Der Weg ist die doppelte Entfernung vom Drehspiegel zum Endspiegel. Der doppelte Drehwinkel ergibt sich aus der Ablenkung des reflektierten Strahles. Aus dem Drehwinkel und der Rotationsfrequenz des Drehspiegels ergibt sich die benötigte Zeitspanne (vgl. D 1.5).

1.4 Demonstrationsversuche

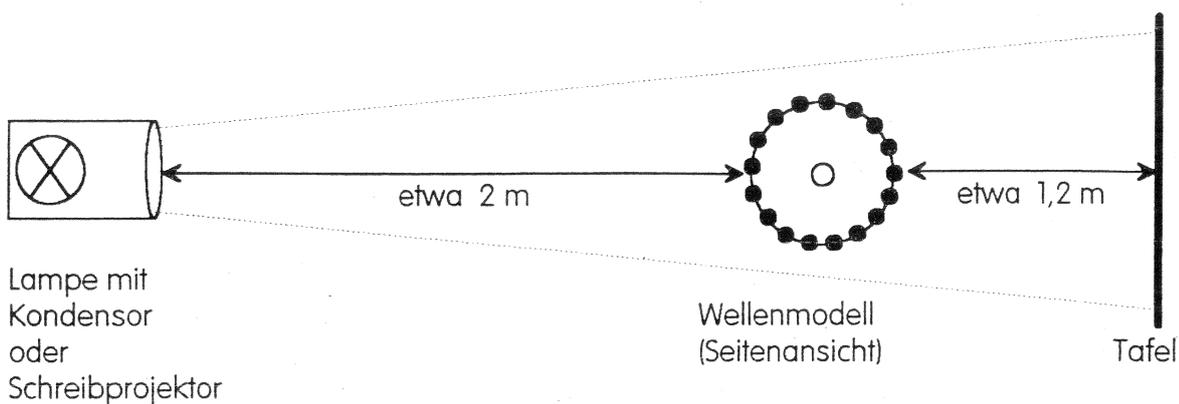
D 1.1 Wellenmodell

Falls in der Schule keine Wellenmaschine zur Verfügung steht, läßt sich folgendermaßen leicht ein Modell herstellen: Auf einer Metallstange (Durchmesser etwa 6 mm) werden im Abstand von 25 cm zwei kreisförmige Scheiben (z. B. aus Plexiglas mit etwa 15 cm Durchmesser) montiert. Zwischen den Scheiben sind 18 Fäden gespannt. Auf jedem Faden befinden sich zwei Styroporkugeln (Durchmesser 2 cm).

Das eine Ende der Stange wird in das Bohrfutter eines Experimentiermotors gesteckt. Das Modell wird bei langsamer Drehung projiziert.

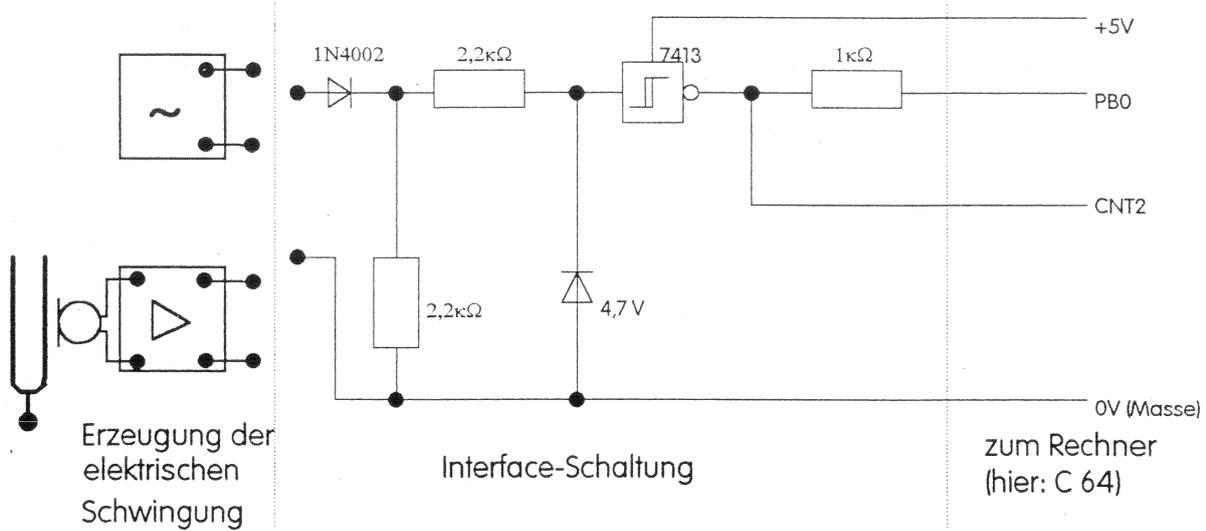


Die Styroporkugeln sind auf den Fäden beweglich. Schiebt man alle Kugeln bis auf eine zu den Seiten, so wird bei der Projektion einer Kugel die Schwingung eines Teilchens dargestellt. Bei zwei Styroporkugeln läßt sich die Schwingung eines Teilchens und die etwas später stattfindende Schwingung des nächsten Teilchens zeigen. Bei geeigneter Anordnung aller Kugeln ergibt sich in der Projektion die Darstellung einer fortschreitenden Welle.



D 1.2 Messung von Schwingungsdauer und Frequenz

Nach dem angegebenen Schaltplan wurde für den Commodore C 64 eine Interface-Schaltung zur Messung von Schwingungsdauern und Frequenzen gebaut:



Bei kleinen Frequenzen mißt der Rechner die Schwingungsdauer (bis 999 s) zwischen ansteigenden Flanken am Eingang PBO; bei großen Frequenzen (bis 400 kHz) registriert ein im Rechner vorhandener Zähler die Impulse am Eingang CNT2 für eine Sekunde. Der Rechner bestimmt das passende Meßverfahren. Die nicht unmittelbar gemessene Größe wird berechnet.¹

Beispiele:

SCHWINGUNGSDAUER :

20.0 ms

FREQUENZ :

50.0

ZUM PROGRAMMANFANG ..

SCHWINGUNGSDAUER :

2.27 ms

FREQUENZ :

440 Hz

ZUM PROGRAMMANFANG A

¹ Nähere Informationen zu dem Programm sind im Iff, Beratungsstelle Physik, zu erhalten.

D 1.3 Messung der Schallgeschwindigkeit, 1. Verfahren

Mit Hilfe von zwei Mikrofonen und Kurzzeitmesser wird die Laufzeit des Schalls bestimmt. Das erste Mikrofon liefert das Startsignal für die Zeitmessung, das zweite Mikrofon (im Abstand s hinter dem ersten) das Stoppsignal. Der Schall kann durch das Zusammenschlagen zweier kurzer Stativstangen erzeugt werden (bei Schallwellen sind Gruppen- und Phasengeschwindigkeit identisch). Eventuell muß das Signal des entfernteren Mikrofons verstärkt werden. Der Abstand der Mikrofone sollte nicht zu klein gewählt werden.

Die folgende Meßreihe wurde mit Geräten der Firma Leybold Didactic durchgeführt:
 Mikrofon, 2 x (585 27), Digitalzähler (575 50), Torsteuerung (575 51)

(Bei der Torsteuerung wurde für das Start- und das Stoppsignal jeweils eine ansteigende Flanke bei Zuschaltung des eingebauten Verstärkers gewählt.)

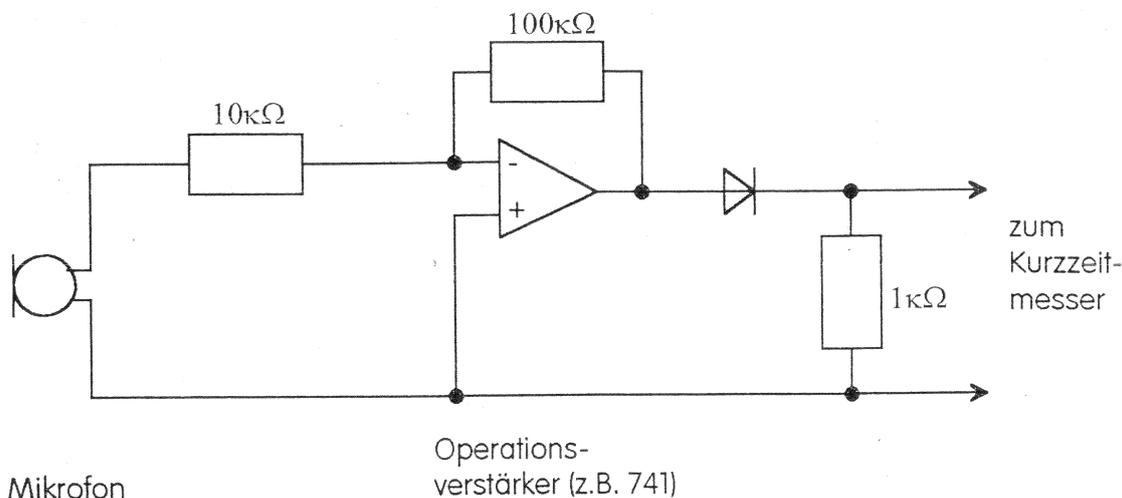
s (m)	0,50	1,00	1,50	2,00
t (ms)	1,50	2,90	4,37	5,79
	1,40	2,92	4,28	5,76
	1,45	2,85	4,29	5,86
	1,40	2,84	4,34	5,69
	1,41	2,86	4,24	5,72
t (ms)	1,432	2,874	4,304	5,764
c	$349 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$348 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$349 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$347 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Bei den Messungen gibt es hin und wieder Fehlmessungen, die durch akustische Störsignale zustande kommen. Sie wurden für die Mittelwertbildung gestrichen. Die Meßwerte zeigen,

- daß für die Schallausbreitung eine Proportionalität zwischen Weg und Zeit besteht, und
- daß die ermittelte Schallgeschwindigkeit in guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert für 25°C ist:

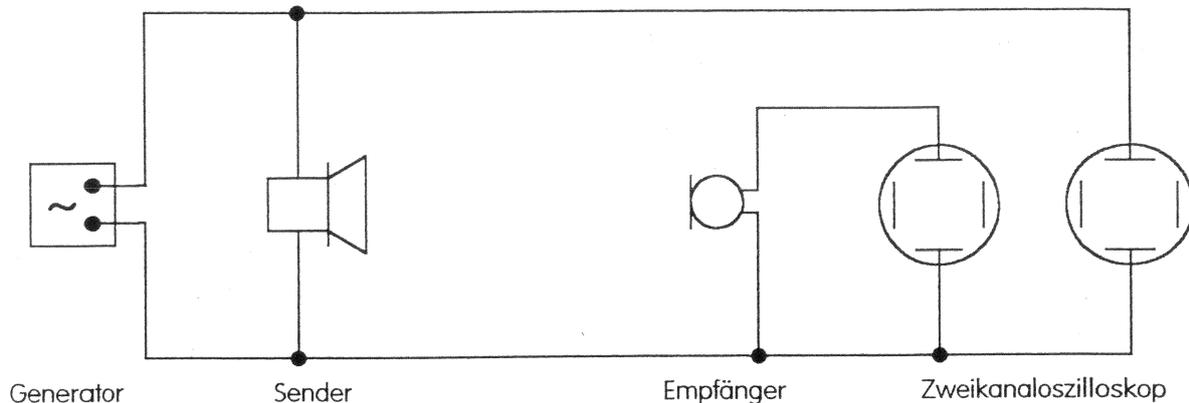
$$c_{(25^\circ\text{C})} = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{25^\circ\text{C}}{273^\circ\text{C}}} = 346 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das Mikrofonsignal läßt sich z.B. mit Hilfe eines Operationsverstärkers verstärken:



D 1.4 Messung der Wellenlänge von Ultraschallwellen

ein Sender, ein Empfänger:

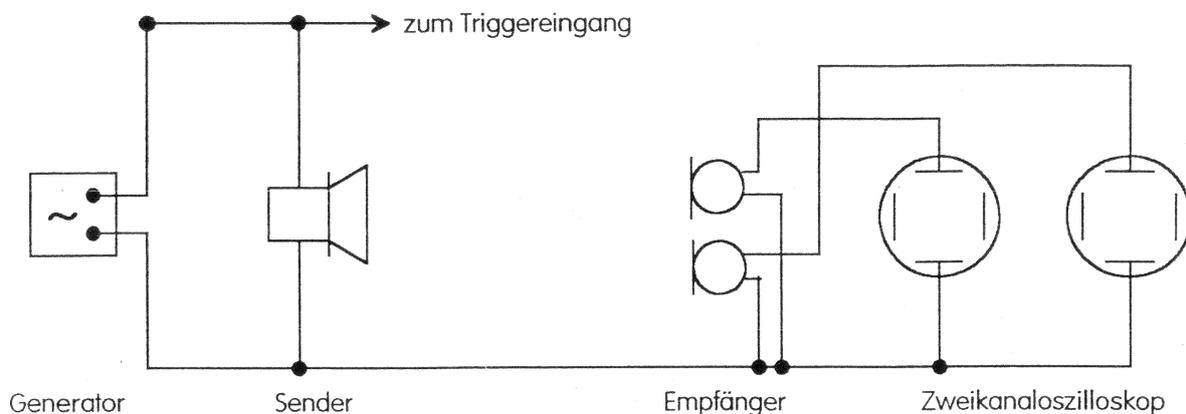


Als Lautsprecher und als Empfänger werden Ultraschallwandler verwendet. Je nach Fabrikat muß eine bestimmte Frequenz, die Resonanzfrequenz des Wandlers, eingestellt werden. Man variiert die Frequenz am Generator, bis das vom Oszilloskop nachgewiesene Signal maximal wird.

Stellt man mit dem Zweikanal-Oszilloskop die Schwingung des Senders (sie wird auch zum Triggern verwendet) und die des Empfängers dar, dann läßt sich am Oszilloskop beobachten, daß sich beim Verschieben des Empfängers das Schwingungsbild gegenüber dem des Senders ändert. Man erkennt gut, wann der Empfänger um eine bestimmte Anzahl von Wellen verschoben worden ist und bestimmt so die Wellenlänge der Ultraschallwellen.

Bei dieser Messung mit einem Mikrofon ist die Justierung einfach, da sich Sender und Empfänger auf einer Geraden befinden. Ein Nachteil sind die sehr unterschiedlichen Intensitäten. Wird der Sender nicht mit einer sinusförmigen Spannung angeregt (vgl. Generator 416 011 von Leybold), so wird natürlich auch die Schwingung des Senders nicht sinusförmig dargestellt.

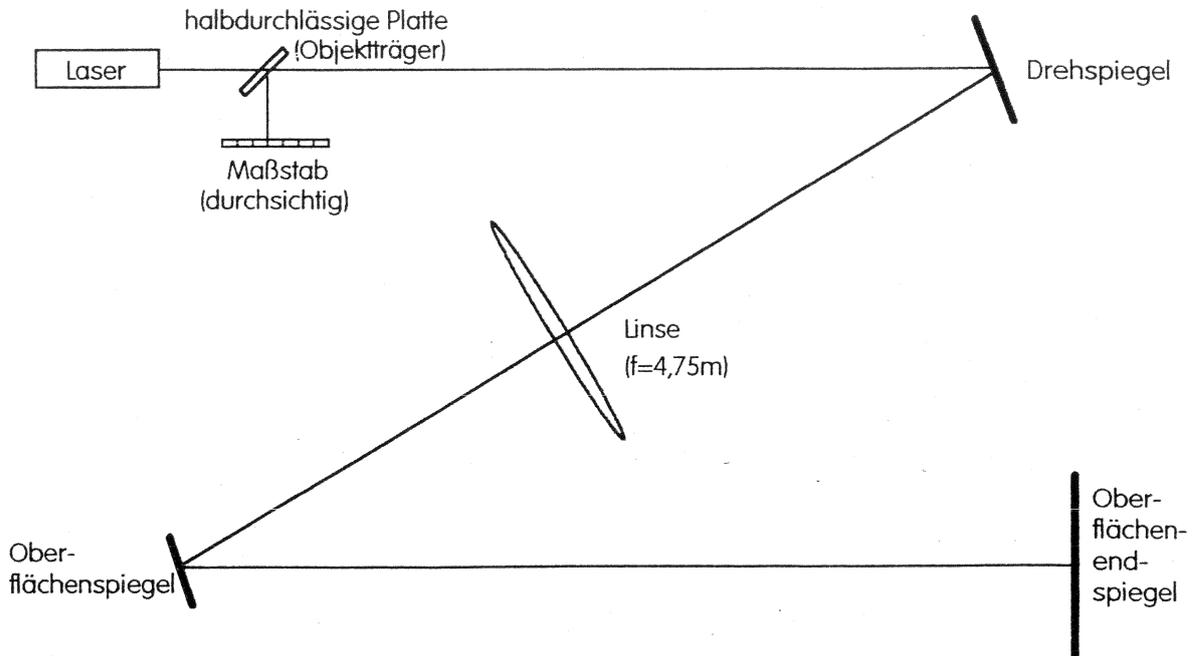
ein Sender, zwei Empfänger:



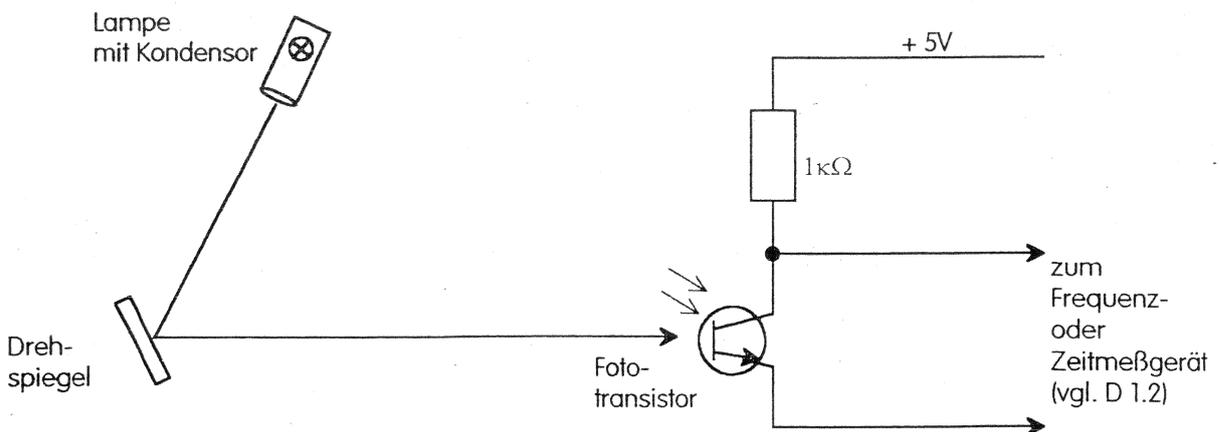
Leichter verständlich ist die Wellenlängenmessung, wenn man mit zwei Mikrofonen arbeitet und die Membranschwingungen beider Empfänger darstellt. Es empfiehlt sich, das Oszilloskop mit dem Signal vom Sender (Generator) zu triggern. Dann kann sich jedes der beiden Schwingungsbilder auf dem Oszilloskop-Schirm mit der Bewegung des zugehörigen Mikrofons verschieben.

D 1.5 Messung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Drehspiegel

Der Versuch ist relativ schnell aufgebaut und durchgeführt, wenn man als Lichtquelle einen Laser verwendet (Achtung: Auf die Gefahr bei der Arbeit mit dem Laser muß hingewiesen werden!).



Der Drehspiegel ist etwa 5 m vom Laser entfernt. Damit der Laserstrahl beim Erreichen des Endspiegels und nach dem Rückweg beim Erreichen des Maßstabes eng genug ist, muß die Linsengleichung beachtet werden. Am einfachsten ist es, die Strecke Laser-Drehspiegel-Linse und die Strecke Linse-Endspiegel jeweils gleich der doppelten Brennweite zu wählen. Die Geschwindigkeit des Drehspiegels kann so eingestellt werden, daß ein akustischer Vergleich mit einer 440-Hz-Stimmgabel Übereinstimmung ergibt. Natürlich läßt sich die Frequenz auch genau messen:

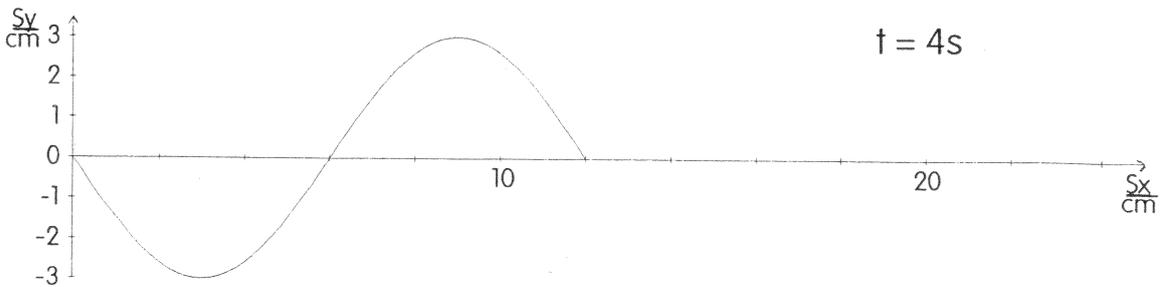
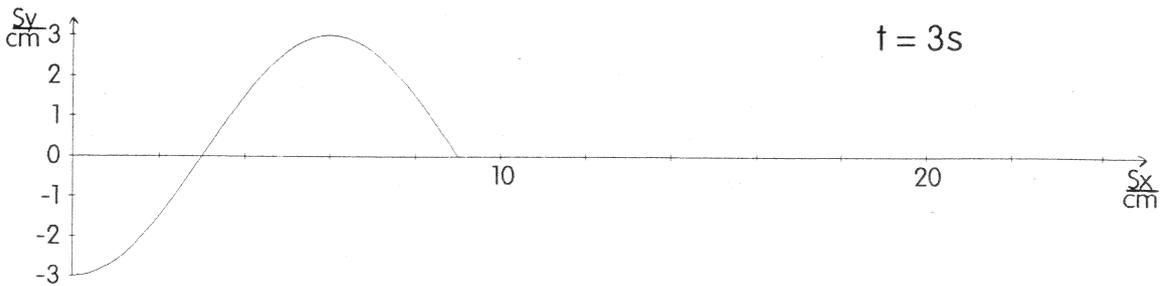
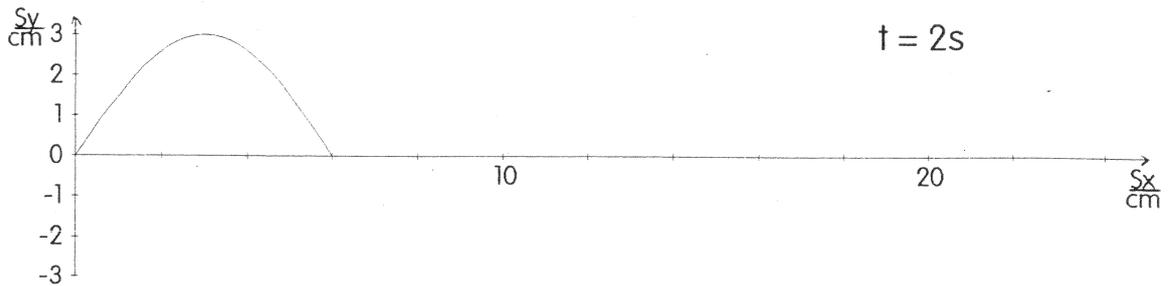
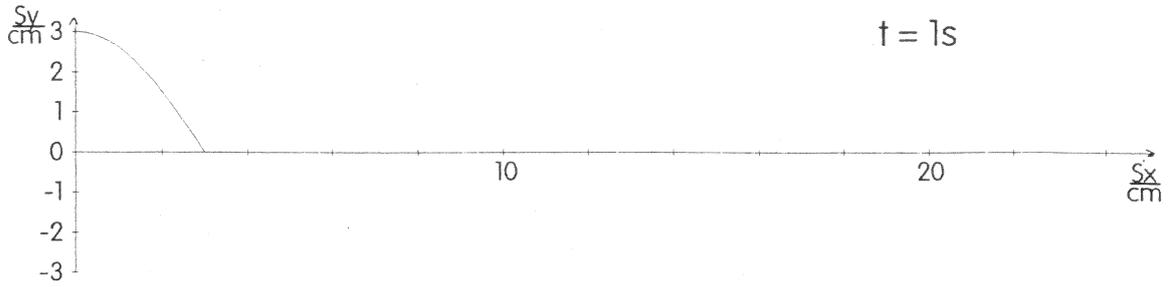


Hier muß beachtet werden, daß der Drehspiegel auf beiden Seiten verspiegelt ist. Die Messung liefert die doppelte Frequenz.

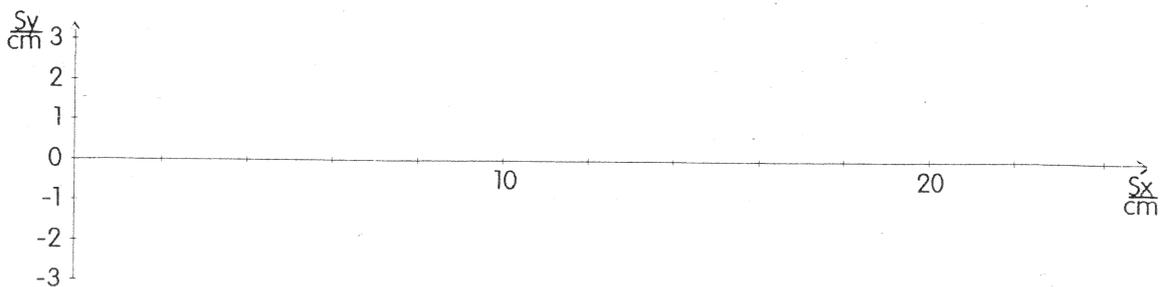
Bei dem angegebenen Versuchsaufbau verschiebt sich der Lichtpunkt auf dem Maßstab etwa um 2 mm bis 3 mm.

1.5 Aufgabenbeispiele

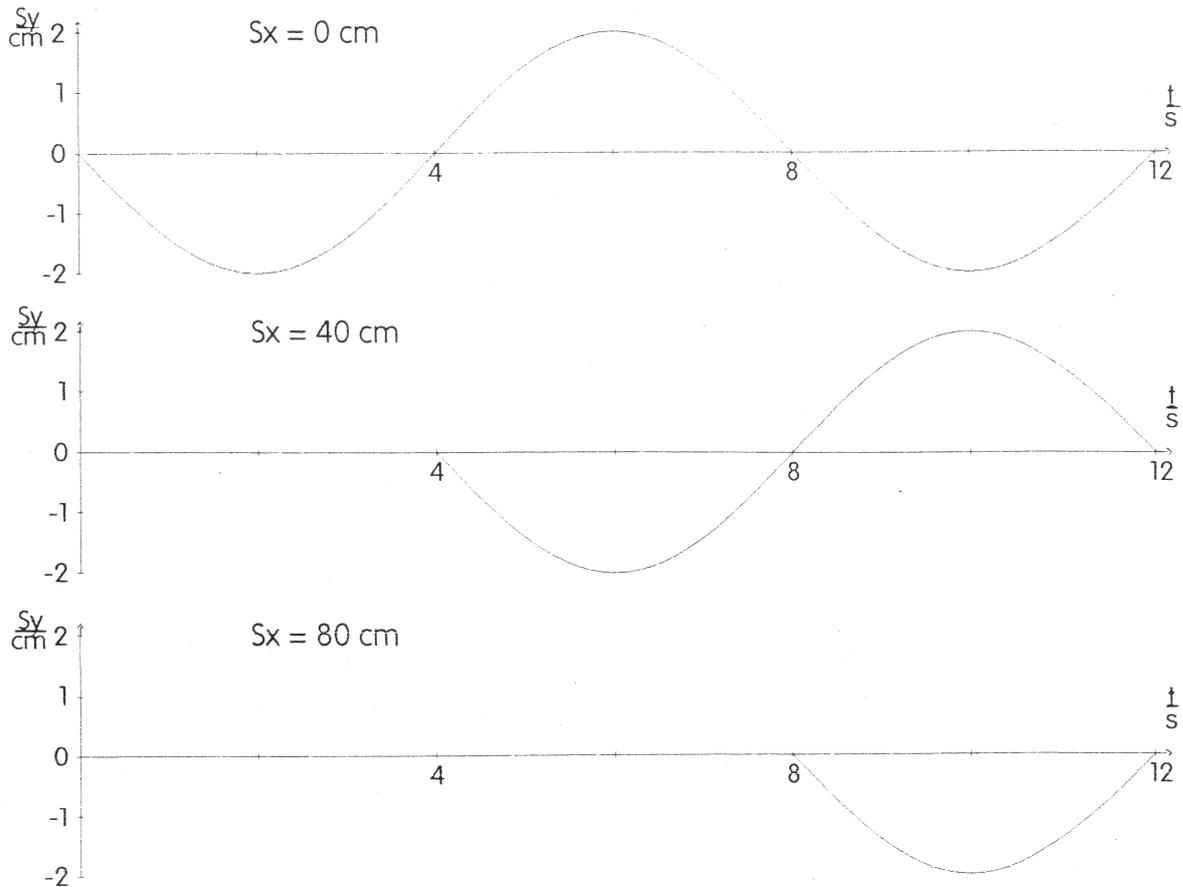
A 1.1 Gegeben sind die folgenden vier Momentaufnahmen einer entstehenden Welle:



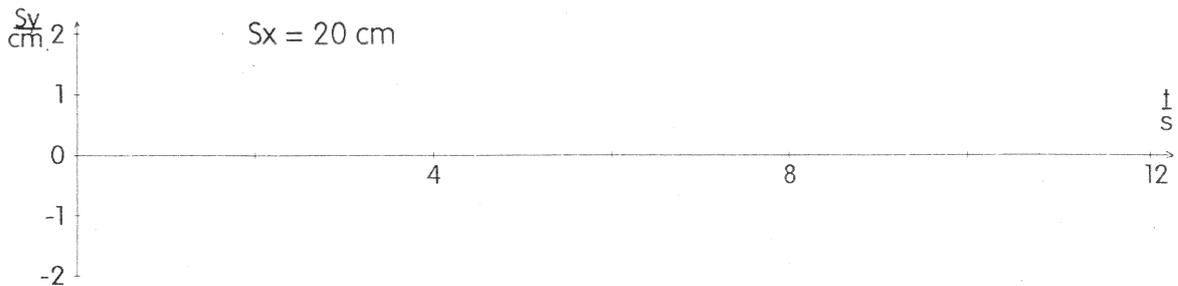
- Bestimmen Sie aus den Diagrammen die folgenden Größen: $s_{y,max}$, λ , c , T und f .
- Skizzieren Sie das Momentbild der Welle zum Zeitpunkt $t = 8$ s.



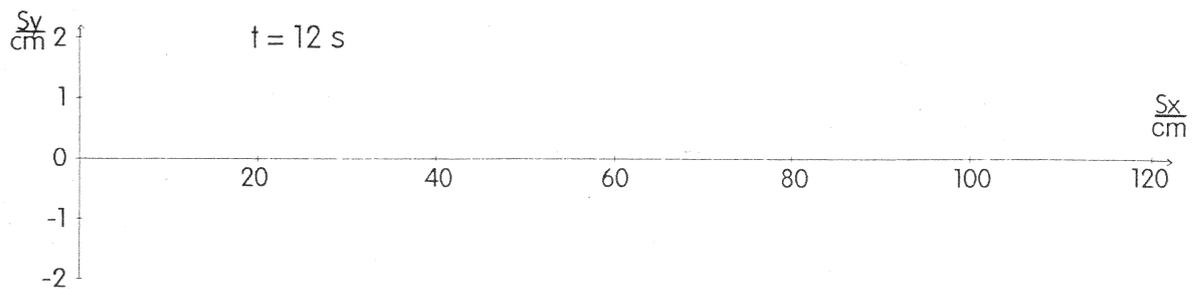
A 1.2 Die drei folgenden Bilder zeigen für eine entstehende Welle Ort-Zeit-Diagramme (Schwingungen) an verschiedenen Orten.



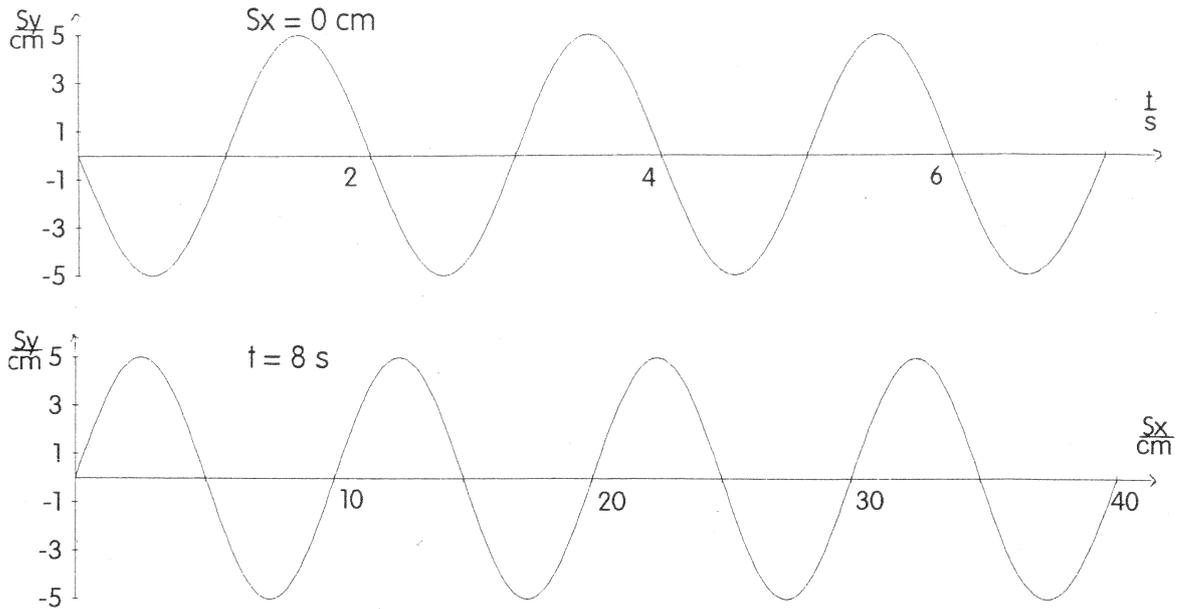
- a) Bestimmen Sie aus den Diagrammen die folgenden Größen: $s_{y,max}$, T , f , c , λ .
 b) Skizzieren Sie das Ort-Zeit-Diagramm für $s_x = 20$ cm.



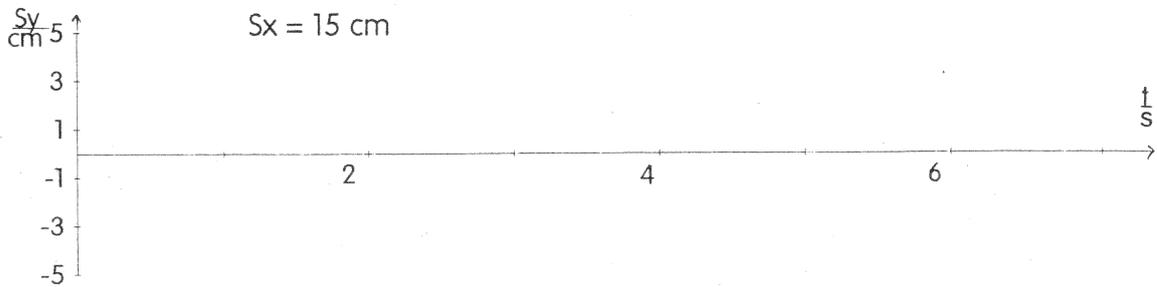
- c) Skizzieren Sie das Momentbild der Welle zum Zeitpunkt $t = 12$ s.



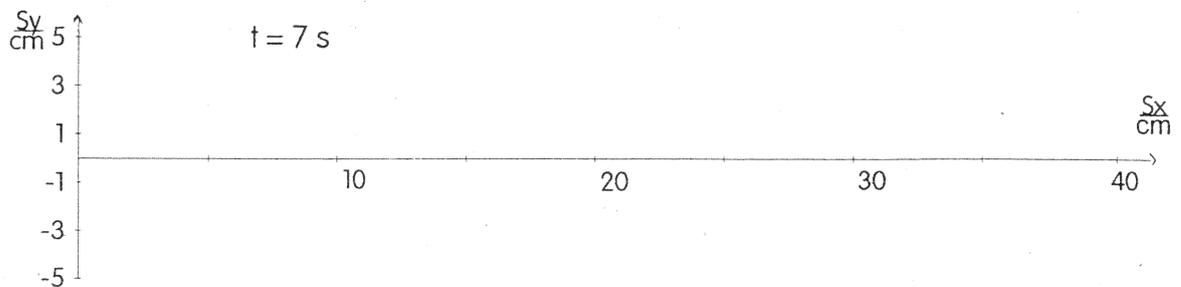
A 1.3 Gegeben sind das Ort-Zeit-Diagramm des Erregers ($s_x = 0$ cm) und ein Momentbild der entstehenden Welle ($t = 8$ s).



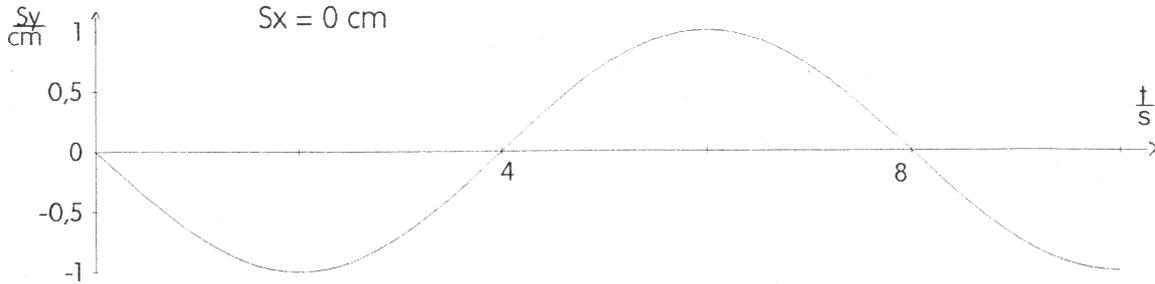
- a) Bestimmen Sie aus den Diagrammen die folgenden Größen: $s_{y,max}$, T , λ , c , f .
 b) Skizzieren Sie das Ort-Zeit-Diagramm für $s_x = 15$ cm.



- c) Skizzieren Sie das Momentbild der Welle zum Zeitpunkt $t = 7$ s.

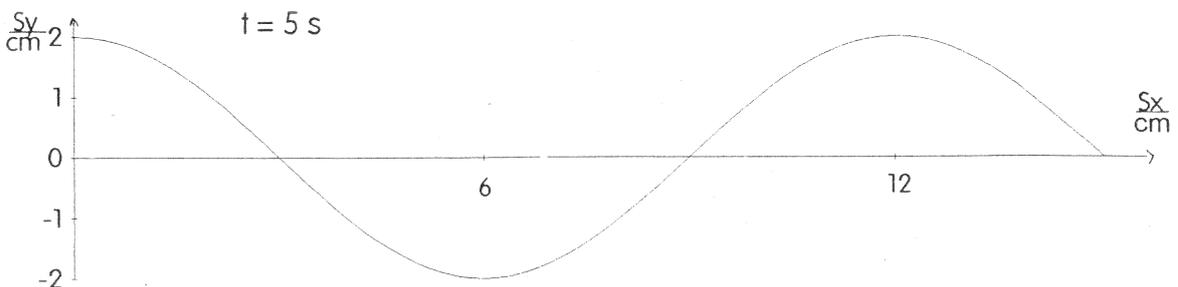


A 1.4 Gegeben ist das Ort-Zeit-Diagramm für den Erreger einer Wasserwelle. Der Erreger beginnt zur Zeit $t = 0$ s zu schwingen. Die entstehende Welle breitet sich mit der Geschwindigkeit von $10 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ aus.



- Bestimmen Sie die folgenden Größen: $s_{y,\text{max}}$, T , f und λ .
- Skizzieren Sie das Momentbild der entstehenden Welle zum Zeitpunkt $t = 8$ s.
- Skizzieren Sie ein Ort-Zeit-Diagramm für ein Wasserteilchen, das 20 cm vom Erreger entfernt ist.

A 1.5 Durch einen Erreger wird eine Wasserwelle erzeugt. Das Momentbild der entstehenden Welle - 5 s nach Beginn der Schwingung des Erregers - hat folgendes Aussehen:



- Bestimmen Sie die folgenden Größen: $s_{y,\text{max}}$, λ , c , T und f .
- Skizzieren Sie das Ort-Zeit-Diagramm für den Erreger.
- Skizzieren Sie ein Ort-Zeit-Diagramm für ein Wasserteilchen, das 6 cm vom Erreger entfernt ist.

A 1.6 Bei der Messung der Laufzeit des Schalls wurden mit Hilfe von Handstoppuhren Zeiten zwischen 0,7 s und 1,5 s gemessen. Die Strecke betrug 300 m.

- Welche Werte für die Schallgeschwindigkeit ergeben sich aus den Messungen?
- Wie groß ist der maximale Fehler gegenüber dem erwarteten Wert von $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$?

A 1.7 Bestimmen Sie jeweils die fehlenden Größen:

	c	f	λ	T
	$1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$			1 s
		0,25 Hz	2 m	
	$1 \frac{\text{m}}{\text{min}}$		0,1 m	
Schallwellen in Luft	$340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$			2 ms
Schallwellen in Eisen		440 Hz	13,3 m	
Schallwellen in Wasser	$1,48 \frac{\text{km}}{\text{s}}$		13,3 m	
Schallwellen in Wasser	$1,48 \frac{\text{km}}{\text{s}}$	440 Hz		

A 1.8 „Die Hochwasserwelle hat Köln erreicht. In vier Stunden wird sie Düsseldorf erreichen.“ Entfernung Köln - Düsseldorf: etwa 50 km.

- Welche Geschwindigkeit hat diese Hochwasserwelle in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$?
- Welche Voraussetzung macht man bei der Berechnung der Geschwindigkeit?
- Warum ist diese Hochwasserwelle keine Welle im physikalischen Sinn?

A 1.9 Ein 100-m-Lauf wird mit Hilfe einer Starterklappe gestartet. Der Starter steht bei den Läufern. Die Zeitnehmer stehen am Ziel. Sie betätigen ihre Handstoppuhren, wenn sie das Startsignal hören.

- Welcher systematische Fehler wird gemacht?
- Wie groß ist dieser Fehler?
- Nehmen Sie an, bei den Bundesjugendspielen wird auf die beschriebene Weise eine Zeit von 14,9 s gemessen. Mit Hilfe der Wettkampfkarte werden für die Schülerleistungen Punkte ermittelt.

Auszug aus der Wettkampfkarte:

Zeit in s	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5
Punkte									
Mädchen ²	625	638	651	665	679	693	707	721	736
Jungen	649	662	675	688	701	714	728	742	756

Welcher Fehler ergibt sich bei der Bestimmung der Punkte?

A 1.10 Beim 400-m-Lauf nehmen die Läufer gestaffelte Startpositionen ein. Der Starter gibt ein akustisches Startsignal. Diskutieren Sie die Fehler, die bei der Zeitmessung auftreten.

² Daß ein Mädchen bei gleicher Leistung eine geringere Punktzahl bekommt, ist noch keine Benachteiligung. Mädchen erhalten Sieger-/Ehrenurkunden bei einer kleineren Gesamtpunktzahl.

A 1.11 Bei normalem Luftdruck hängt die Schallgeschwindigkeit c in Luft folgendermaßen von der Temperatur ϑ ab:

$$c = 331,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273^\circ\text{C}}} \quad (\text{vgl. Höfling: Physik, Bd. II, Teil 1}).$$

a) Berechnen Sie die Schallgeschwindigkeit für $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, 20°C , 25°C , 100°C , -20°C .

b) Skizzieren Sie c in Abhängigkeit von ϑ für $0^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 50^\circ\text{C}$.

A 1.12 Gegeben ist ein Schlauch der Länge 2,76 m.

a) Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt $346 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (bei $\vartheta = 25^\circ\text{C}$). Berechnen Sie die Laufzeit der Schallwellen durch den luftgefüllten Schlauch.

b) Wird dieser Schlauch mit CO_2 gefüllt, beträgt die Laufzeit 10 ms. Welcher Wert ergibt sich hieraus für die Schallgeschwindigkeit in CO_2 (bei 25°C)?

A 1.13 Um 1827 bestimmten Colladon und Sturm am Genfer See die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser, indem sie eine Glocke unter Wasser anschlugen und mit einem hörrohrähnlichen Instrument in 13.365 m Entfernung den Ton auffingen. Der Schall benötigte für diese Strecke ca. 9 Sekunden.

a) Welche Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus dieser Messung?

b) Wie lange hätte der Schall in Luft für diese Strecke benötigt?

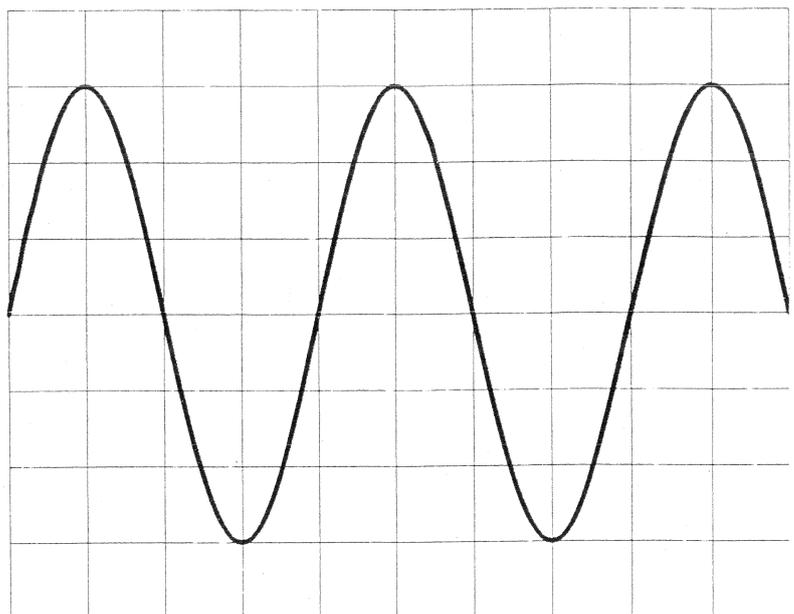
Rechnen Sie mit $c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

A 1.14 Wie groß sind Amplitude, Schwingungsdauer und Frequenz der Schwingung, die auf dem nebenstehenden Oszilloskop-Bild dargestellt wird?

Einstellung des Oszilloskops:

Ablenkung in senkrechter Richtung: $2 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$,

in waagerechter Richtung: $5 \frac{\text{ms}}{\text{cm}}$.



A 1.15 Ein Ultraschallsender ($f = 37 \text{ kHz}$) sendet eine Schallwelle aus.

- a) Welche Wellenlänge ergibt sich, wenn man annimmt, daß die Schallgeschwindigkeit $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt?

Die Wellenlänge wird in a) nur ungenau bestimmt, wenn der Wert für die Schallgeschwindigkeit ungenau ist. Mit Hilfe des folgenden Versuches soll die Wellenlänge genauer bestimmt werden:

Zwei Mikrofone sind unterschiedlich weit von dem Ultraschallsender ($f = 37 \text{ kHz}$) entfernt. Der Entfernungsunterschied Δs beträgt $2,8 \text{ cm}$. Mit Hilfe eines Oszilloskops wird nachgewiesen, daß die Membranen beider Mikrofone phasengleich schwingen.

- b) Geben Sie den Entfernungsunterschied in Vielfachen der Wellenlänge an.
c) Welche Wellenlänge ergibt sich aus diesem Versuch?
d) Welche Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus diesem Versuch?

A 1.16 Radiowellen breiten sich im Vakuum (oder in Luft) mit der Geschwindigkeit $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus.

- a) Gegeben sind die folgenden Wellenlängenbereiche; in Klammern die in Europa für Rundfunkwellen festgelegten Bereiche:

Langwelle	600 m - 3000 m	(1050 m - 2000 m)
Mittelwelle	100 m - 600 m	(187 m - 570 m)
Kurzwelle	10 m - 100 m	(11 m - 49 m)
Ultrakurzwelle	1 m - 10 m	(2,9 m - 3,4 m)

Berechnen Sie die Frequenzbereiche für diese Radiowellen.

- b) Berechnen Sie zu den folgenden Frequenzen die zugehörigen Wellenlängen: NDR 2, Hamburg: $87,6 \text{ MHz}$, NDR 4, Hamburg: 972 kHz .
c) Berechnen Sie zu den folgenden Wellenlängenbereichen von Fernsehwellen die zugehörigen Frequenzbereiche:
VHF (very high frequency): $1 \text{ m} - 10 \text{ m}$,
UHF (ultra high frequency): $0,1 \text{ m} - 1 \text{ m}$.

A 1.17 Bei einem bestimmten Modell eines Mikrowellenherdes ist die Nennfrequenz angegeben: 2450 MHz . Weshalb muß der Hersteller eines solchen Gerätes bei der Bundespost eine Zulassung beantragen?

A 1.18 a) Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa $385\,000 \text{ km}$ entfernt. Wie lange braucht ein Lichtsignal, um diese Strecke zurückzulegen ($3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)?

- b) Wie lange braucht ein Lichtsignal von der Sonne bis zur Erde (Entfernung: $150\,000\,000 \text{ km}$)?

- c) Der erdnächste Fixstern (α -Centauri) ist $4,3$ Lichtjahre von der Erde entfernt. Berechnen Sie diese Strecke in Kilometern.

A1.19 Nahverkehrszüge verlassen in regelmäßigen Abständen den Bahnhof. Ein stehender Beobachter am Bahngleis stellt fest, daß alle 10 min ein Zug fährt. Bewegt sich der Beobachter am Bahngleis mit der Geschwindigkeit $5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ in Fahrtrichtung der Züge, so stellt er fest, daß die Züge ihn alle 11 min passieren. Mit welcher Geschwindigkeit fahren die Züge (bei der Annahme, daß die Züge sich gleichförmig bewegen)?

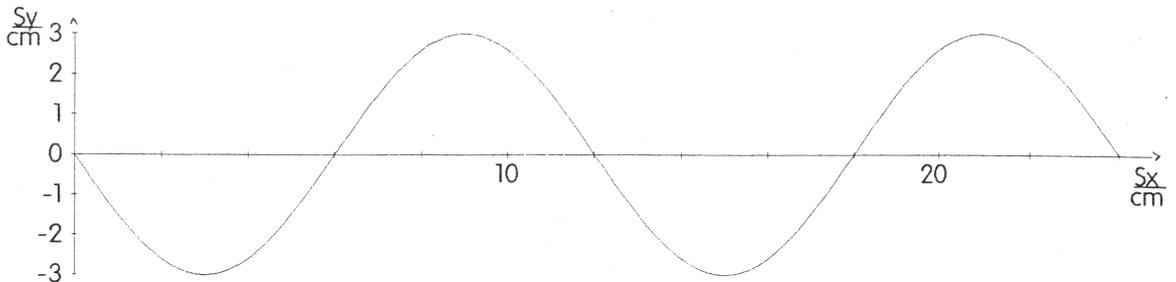
- A 1.20**
- Die Erde bewegt sich in einem Jahr (in 365,256 Tagen) einmal um die Sonne. Der Radius der Erdbahn beträgt $149,6 \cdot 10^6$ km. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne?
 - Der Jupitermond Io hat eine Umlaufzeit von 1,77 d. Welche Strecke legt die Erde in dieser Zeit auf ihrer Bahn um die Sonne zurück?
 - Welchen Fehler macht man bei der Messung der Umlaufzeit des Io von der Erde aus, wenn sich die Erde vom Jupiter mit ihrer Bahngeschwindigkeit entfernt? (Lichtgeschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)
 - Welche Werte hätte man bei b) und c) erhalten, wenn man statt des Io die nächsten Jupitermonde mit den Umlaufzeiten 3,55d, 7,16d und 16,7d beobachtet hätte?
- A 1.21**
- Fizeau benutzte für seine Lichtgeschwindigkeitsmessung ein Zahnrad mit $n = 720$ Zähnen, das 756 Umdrehungen pro Minute machte (Frequenz f). Die Entfernung vom Zahnrad bis zum Spiegel betrug $e = 8\,633$ m. Das Licht, das auf dem Hinweg durch eine Zahnlücke fiel, traf auf dem Rückweg - nach Reflexion am Spiegel - auf den der Lücke benachbarten Zahn. Aus den Daten konnte Fizeau die Lichtgeschwindigkeit ausrechnen: $c = 2e \cdot f \cdot 2n$.
- Zeigen Sie, daß sich nach den Messungen von Fizeau für die Lichtgeschwindigkeit der Wert $c = 3,13 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt.
 - Leiten Sie die angegebene Gleichung ab.
 - Angenommen, man wollte die Messung von Fizeau im Labor durchführen und hätte für den Weg vom Zahnrad zum Spiegel nur eine Strecke von 10 m zur Verfügung. Wie viele Umdrehungen müßte das Zahnrad in der Minute machen, damit es sich jetzt auch während der Laufzeit des Lichtes um einen halben Zahnabstand weiterdrehen würde? (Rechnen Sie hier mit der Lichtgeschwindigkeit von $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.)
 - Bei c) ergibt sich eine sehr hohe Frequenz. Welche anderen Abänderungen hätte man im Labor vornehmen können?
- A 1.22**
- Bei der Lichtgeschwindigkeitsmessung mit dem Drehspiegel werden folgende Werte ermittelt: Entfernung Drehspiegel - Maßstab: 4,75 m; Entfernung Drehspiegel-Endspiegel: 14,25 m; Frequenz des Drehspiegels: 440 Hz; Ablenkung des Lichtpunktes auf dem Maßstab: 2,5 mm.
- Um welchen Winkel wurde der Lichtstrahl auf seinem Rückweg beim Drehspiegel gegenüber der ursprünglichen Richtung abgelenkt?
 - Um welchen Winkel hat sich der Drehspiegel während der Laufzeit des Lichtes vom Drehspiegel zum Endspiegel und wieder zum Drehspiegel gedreht?
 - Welche Zeit wurde dafür benötigt?
 - Welcher Wert ergibt sich aus dieser Messung für die Lichtgeschwindigkeit?

Lösungen

zu A 1.1 a) $s_{y,\max} = 3 \text{ cm}$; $\lambda = 12 \text{ cm}$ (4. Bild); $c = 3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ (Vergleich zweier Bilder)

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{12 \text{ cm}}{3 \text{ cm/s}} = 4 \text{ s}; \quad f = \frac{1}{T} = 0,25 \text{ Hz}$$

b)

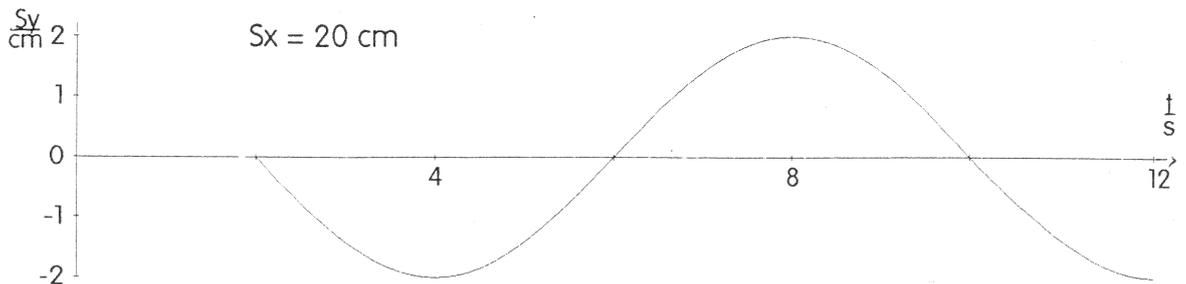


zu A 1.2 a) $s_{y,\max} = 2 \text{ cm}$; $T = 8 \text{ s}$ (1. Bild); $f = 0,125 \text{ Hz}$

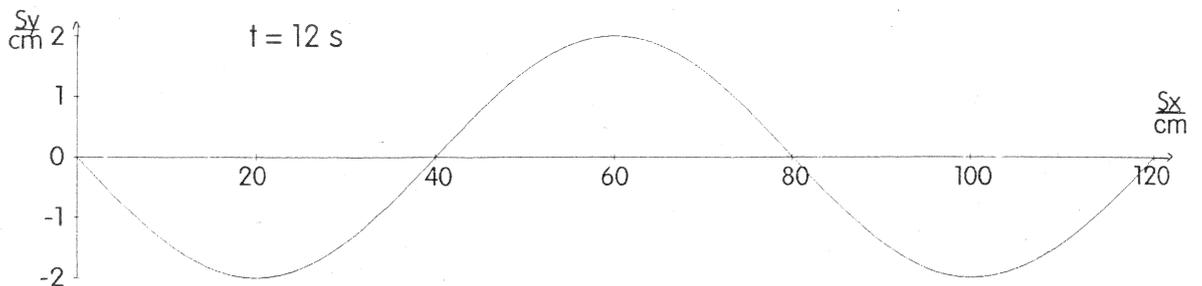
Die Schwingung beginnt 4 s später bei $s_x = 40 \text{ cm}$, also $c = 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$;

$$\lambda = T \cdot c = 80 \text{ cm}.$$

b)



c)

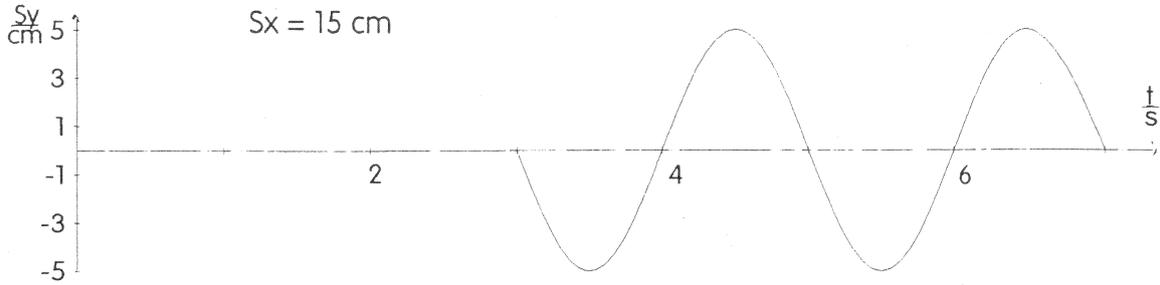


Das Teilchen bei 20 cm befindet sich zur Zeit 12 s am tiefsten Punkt (vgl. (b)). Der Erreger hat mit seiner Bewegung nach unten begonnen (vgl. 1. Bild in der Aufgabenstellung), also breitet sich zunächst ein Wellental aus.

zu A 1.3 a) $s_{y,max} = 5 \text{ cm}$; $T = 2 \text{ s}$ (1. Bild); $\lambda = 10 \text{ cm}$ (2. Bild),

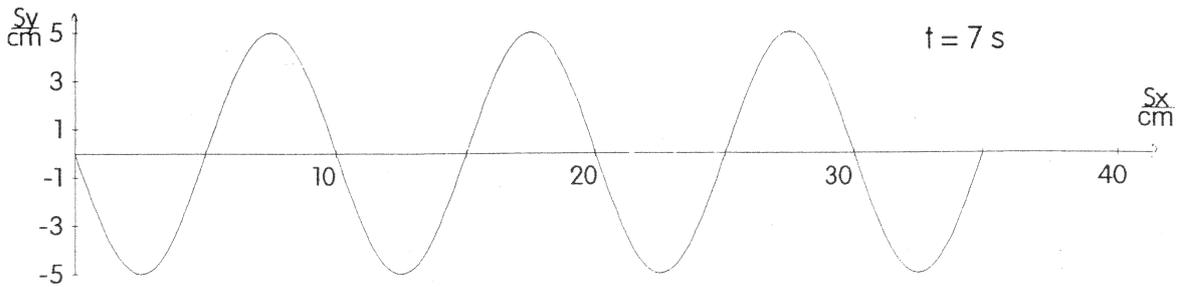
$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{10 \text{ cm}}{2 \text{ s}} = 5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}; \quad f = \frac{1}{T} = 0,5 \text{ Hz.}$$

b)



Das Teilchen am Ort $s_x = 15 \text{ cm}$ schwingt wie der Erreger, aber es beginnt erst 3 s später.

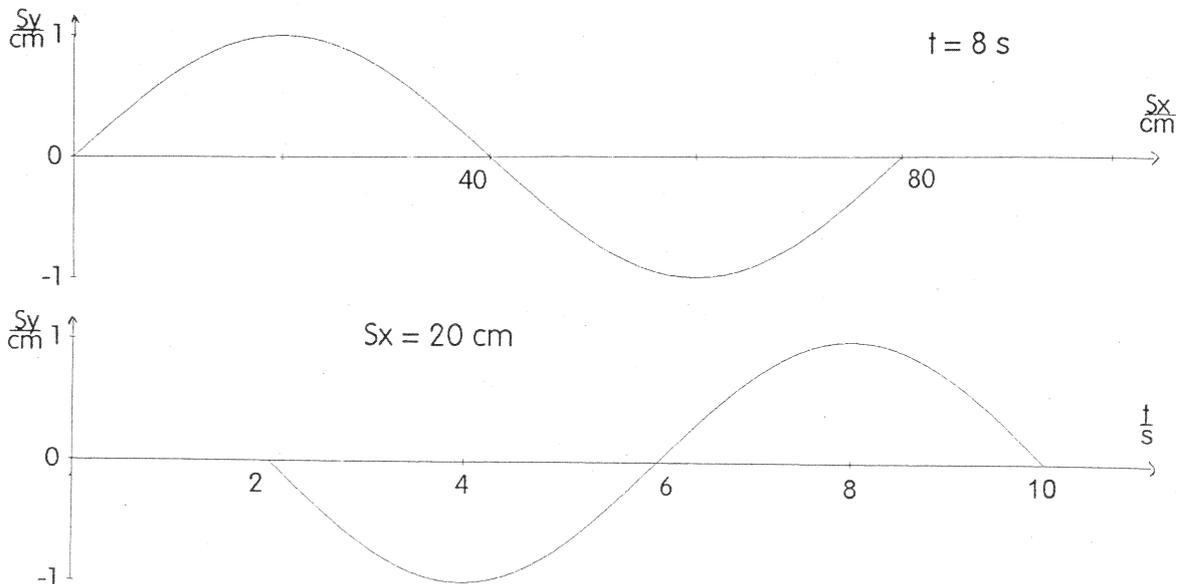
c)



Die Welle hat sich erst 35 cm ausgebreitet.

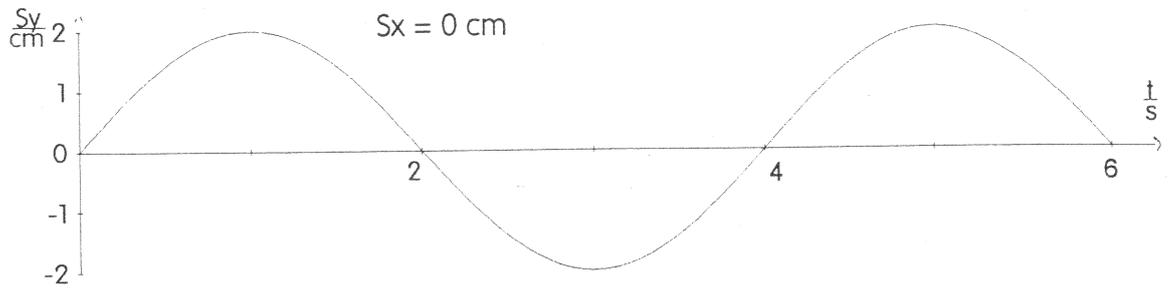
zu A 1.4 a) $s_{y,max} = 1 \text{ cm}$; $T = 8 \text{ s}$; $f = 0,125 \text{ Hz}$; $\lambda = c \cdot T = 80 \text{ cm}$.

b)

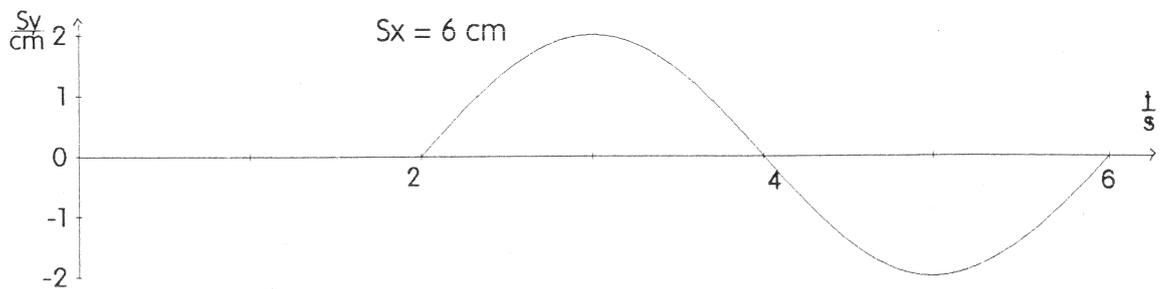


zu A 1.5 a) $s_{y,\max} = 2 \text{ cm}$; $\lambda = 12 \text{ cm}$; $c = 3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$; $T = 4 \text{ s}$; $f = 0,25 \text{ Hz}$.

b)



c)



zu A 1.6 $c_1 = \frac{300\text{m}}{0,7\text{s}} = 429 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $\Delta c_1 = 89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $f_1 = 26\%$, $c_2 = \frac{300\text{m}}{1,5\text{s}} = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $\Delta c_2 = 140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $f_2 = 41\%$

zu A 1.7

	c	f	λ	T
	$1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	1 Hz	1 cm	1 s
	$0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	0,25 Hz	2 m	4 s
	$1 \frac{\text{m}}{\text{min}}$	0,167 Hz	0,1 m	6 s
Schallwellen in Luft	$340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	500 Hz	0,68 m	2 ms
Schallwellen in Eisen	$5852 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	440 Hz	13,3 m	2,27 ms
Schallwellen in Wasser	$1,48 \frac{\text{km}}{\text{s}}$	111,3 Hz	13,3 m	8,99 ms
Schallwellen in Wasser	$1,48 \frac{\text{km}}{\text{s}}$	440 Hz	3,36 m	2,27 ms

zu A 1.8 a) $c = \frac{50 \text{ km}}{4 \text{ h}} = \frac{50 \cdot 1000 \text{ m}}{4 \cdot 3600 \text{ s}} = 3,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, also $c \approx 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- b) Es wird vorausgesetzt, daß es sich um eine gleichförmige Bewegung handelt.
- c) Bei einer Welle im physikalischen Sinn wird Energie, aber keine Masse transportiert.

zu A 1.9 a) Die Zeitnehmer ermitteln eine zu kleine Laufzeit, da sie ihre Stoppuhren erst betätigen, wenn der Schall die Strecke von 100 m zurückgelegt hat.

b) $\Delta t = \frac{100 \text{ m} \cdot \text{s}}{340 \text{ m}} = 0,294 \text{ s} \approx 0,3 \text{ s}$

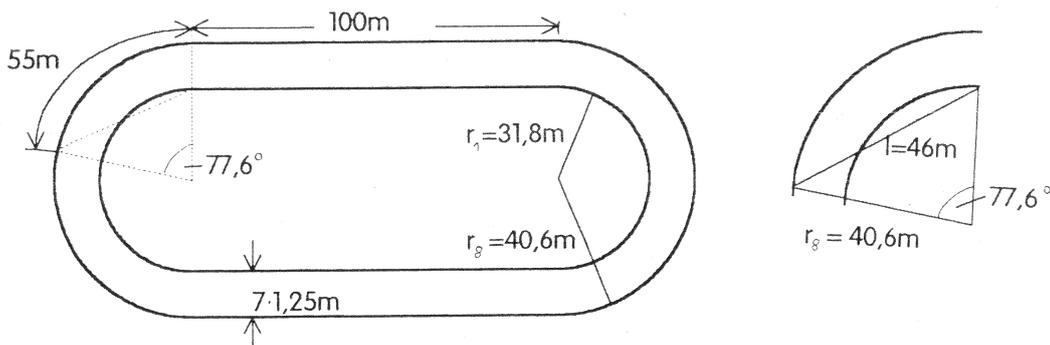
- c) Mädchen: 14,9 s: 679 Punkte
 15,2 s: 638 Punkte
 Bei falscher Zeitmessung werden 41 Punkte zu viel ermittelt.
- Jungen: 14,9 s: 701 Punkte
 15,2 s: 662 Punkte
 Bei falscher Zeitmessung werden 39 Punkte zu viel ermittelt.

zu A 1.10 Wegen der gestaffelten Startpositionen hören die Läufer das Startsignal zu verschiedenen Zeitpunkten. Wenn der Starter bei der Startposition des Läufers auf der Innenbahn steht (Ziel für alle Läufer), ist der Läufer auf der äußersten Bahn am meisten benachteiligt.

An eine quantitative Auswertung durch die Schüler ist hier nicht gedacht, trotzdem sollen einige Werte angegeben werden:

Die Innenbahn besteht aus zwei geraden Strecken und zwei Halbkreisen (Radius 31,8 m) von je 100 m Länge. Die Breite jeder Bahn beträgt 1,25 m. Daraus läßt sich der Abstand der Läufer beim Start berechnen.

Die Halbkreise für die Bahn des achten Läufers haben einen Radius von $31,8 \text{ m} + 7 \cdot 1,25 \text{ m} = 40,6 \text{ m}$. Seine Startposition ist auf seiner Bahn also $7 \cdot 7,85 \text{ m} = 55 \text{ m}$ vorverlegt. Mit Hilfe des Cosinussatzes läßt sich der Abstand zwischen dem ersten und dem achten Läufer beim Start ausrechnen. Dieser Abstand beträgt 46 m. Steht der Starter beim Läufer auf der Innenbahn, so hört der Läufer auf der Außenbahn das Startsignal etwa 0,13 s später.

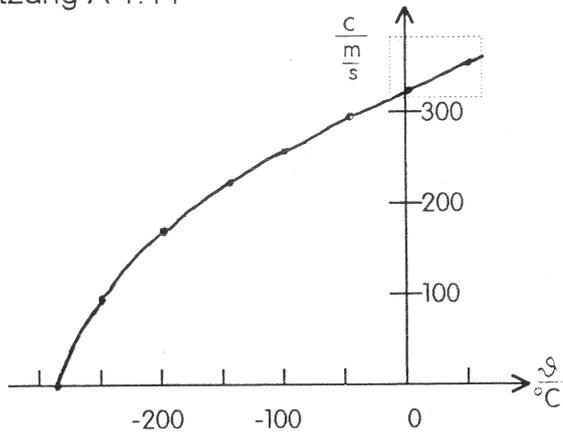


Zu A 1.11

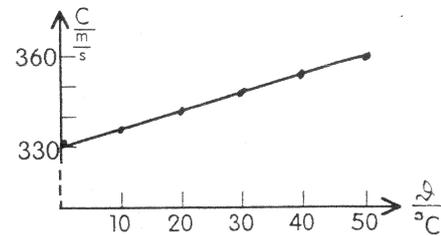
a)	ϑ in $^{\circ}\text{C}$	0	20	25	100	-20
	c in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	331,6	343,5	346,5	387,6	319,2

b)	ϑ in $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50
	c in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	331,6	337,6	343,5	349,3	355,1	360,7

Fortsetzung A 1.11



Der Ausschnitt aus dem Θ - c -Diagramm zeigt einen fast linearen Teil einer (nach rechts geöffneten) Parabel.



zu A 1.12 a) 7,98 ms

b) $276 \frac{m}{s}^3$

zu A 1.13 Die Beschreibung dieser Schallgeschwindigkeitsmessung wurde zitiert aus: Sexl, Raab, Streeruwitz: "Der Weg zur modernen Physik", Band 2.

a) $1.485 \frac{m}{s}$. Die Genauigkeit dieser Geschwindigkeitsangabe ist bei der ungenauen Zeitmessung fragwürdig.

b) 39,9 s.

zu A 1.14 $U_{\max} = 6 \text{ V}$; $T = 20 \text{ ms}$; $f = 50 \text{ Hz}$ zu A 1.15 a) $\lambda \approx \frac{340 \frac{m}{s}}{37 \text{ kHz}} = 9,19 \text{ mm}$

b) Der Entfernungsunterschied Δs muß ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein: $\Delta s = z \cdot \lambda$.

$$\frac{\Delta s}{\lambda} = \frac{2,8 \text{ cm}}{0,92 \text{ cm}} = 3,04, \text{ also } z = 3.$$

c) $\lambda = \frac{\Delta s}{3} = \frac{2,8 \text{ cm}}{3} = 9,33 \text{ mm}$.d) $c = \lambda \cdot f = 9,33 \text{ mm} \cdot 37.000 \text{ Hz} = 345 \frac{m}{s}$.

zu A 1.16 a)

Langwelle:	$5 \cdot 10^5 \text{ Hz} - 1 \cdot 10^5 \text{ Hz}$	$(2,86 \cdot 10^5 \text{ Hz} - 1,5 \cdot 10^5 \text{ Hz})$
Mittelwelle:	$3 \cdot 10^6 \text{ Hz} - 5 \cdot 10^5 \text{ Hz}$	$(1,60 \cdot 10^6 \text{ Hz} - 5,26 \cdot 10^5 \text{ Hz})$
Kurzwelle:	$3 \cdot 10^7 \text{ Hz} - 3 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	$(2,73 \cdot 10^7 \text{ Hz} - 6,12 \cdot 10^6 \text{ Hz})$
Ultrakurzwelle:	$3 \cdot 10^8 \text{ Hz} - 3 \cdot 10^7 \text{ Hz}$	$(1,03 \cdot 10^8 \text{ Hz} - 8,82 \cdot 10^7 \text{ Hz})$

³ Der Literaturwert für die Schallgeschwindigkeit in CO_2 bei $25^{\circ}C$ beträgt $272 \frac{m}{s}$. Der Demonstrationsversuch, der dieser Aufgabe zugrundeliegt, wird im Kapitel „Reflexion und Brechung“ beschrieben.

- zu A 1.16 b) NDR 2: 3,42 m (Ultrakurzwellen)
 NDR 4: 309 m (Mittelwellen; NDR 4 sendet auch auf 92,3 MHz)
 c) VHF: $3 \cdot 10^6 \text{ Hz} - 3 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ (300 MHz – 30 MHz)
 UHF: $3 \cdot 10^9 \text{ Hz} - 3 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ (3000 MHz – 300 MHz)

zu A 1.17 Die Wellenlänge beträgt: $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}}{2,45 \cdot 10^9 \text{ s}} = 0,122 \text{ m} = 12,2 \text{ cm}$.

Die Post prüft, ob die technischen Vorschriften für die Funkentstörung von Mikrowellenherden erfüllt sind. Diese Wellen liegen im Bereich von Fernschwellen.

- zu A 1.18 a) 1,28 s b) 500 s = 8,33 min
 c) $t = 4,3 \text{ a} = 4,3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 135\,600\,000 \text{ s}$
 $s = c \cdot t = 4,07 \cdot 10^{16} \text{ m} = 4,07 \cdot 10^{13} \text{ km}$

zu A 1.19 Der Zug benötigt für die Strecke, die der Beobachter in 11 min zurücklegt, die zusätzliche Fahrzeit von 1 min.

Es gilt also: $v_z \cdot 1 \text{ min} = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 11 \text{ min}; v_z = 55 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

- zu A 1.20 a) $v_E = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} = 29,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
 b) $s = 1,77 \text{ d} \cdot 29,8 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 4,56 \cdot 10^6 \text{ km}$
 c) $\Delta t = \frac{4,56 \cdot 10^6 \text{ km}}{3 \cdot 10^8 \text{ m}} \text{ s} = 15,2 \text{ s}$

d)

Jupitermond	Umlaufzeit	Strecke s	Fehler Δt
I (Io)	1,77 d	$4,56 \cdot 10^6 \text{ km}$	15,2 s
II	3,55 d	$9,14 \cdot 10^6 \text{ km}$	30,5 s
III	7,16 d	$18,4 \cdot 10^6 \text{ km}$	61,5 s
IV	16,7 d	$43,0 \cdot 10^6 \text{ km}$	143 s

- zu A 1.21 a) $f = 12,6 \text{ Hz}; c = 2 \cdot 8\,633 \text{ m} \cdot 12,6 \text{ Hz} \cdot 2 \cdot 720 = 3,13 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 b) $\Delta t = \frac{1}{f} : (2 \cdot n); c$ ist der Quotient von $2 \cdot e$ und Δt .
 c) Mit $e = 10 \text{ m}$ ergibt sich: $f = 10\,400 \text{ Hz} = 625\,000 \frac{1}{\text{min}}$.
 d) Man hätte die Zahl der Zähne erhöhen, den Lichtweg durch weitere Umlenkspiegel vergrößern können.

- zu A 1.22 a) $\tan \alpha = \frac{2,5 \text{ mm}}{4,75 \text{ m}}; \alpha = 0,03016^\circ$ b) $\frac{\alpha}{2} = 0,01508^\circ$
 c) $\Delta t = \frac{1 \text{ s}}{440} \cdot \frac{0,01508^\circ}{360^\circ} = 9,52 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ d) $\frac{2 \cdot 14,25 \text{ m}}{9,52 \cdot 10^{-8} \text{ s}} = 2,99 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2. Reflexion und Brechung

2.1 Inhalte

- Einfallslot, Einfallswinkel, Reflexionswinkel, Reflexionsgesetz
- Brechungswinkel, Brechungsgesetz, Brechungszahl
- Totalreflexion und Grenzwinkel

Bemerkungen:

Hier werden bekannte Begriffe und Gesetze aus der geometrischen Optik auf Wellen in unterschiedlichen Phänomenbereichen übertragen. Das Brechungsgesetz wird mit Hilfe der Sinusfunktion formuliert.

2.2 Unterrichtsgang

- 9. Stunde: Reflexionsgesetz; Echolot
- 10. Stunde: Brechungsgesetz, Brechungszahl; Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien
- 11. Stunde: Totalreflexion: Lichtleiter

2.3 Hinweise zu den Stunden

9. Stunde:

Die Reflexion ist aus der geometrischen Optik bekannt. Hier soll die Reflexion für unterschiedliche Phänomenbereiche untersucht werden.

Zu Beginn wird ein Experiment mit Schallwellen vorgeführt. Versuch D 2.1 kann in das Thema einführen. Bei Versuch D 2.3 können anhand der Reflexion von Ultraschallwellen die aus der Sekundarstufe I bekannten Begriffe Ausbreitungsrichtung, Einfallslot, Einfallswinkel und Reflexionswinkel wiederholt werden.⁴⁾ Parallel zur Durchführung des Experimentes wird eine Tafelzeichnung entwickelt, in der die Begriffe verdeutlicht werden (vgl. in der Bildfolge weiter unten Bild 9). Für unterschiedliche Winkel wird das Reflexionsgesetz demonstriert (Reflexionswinkel gleich Einfallswinkel; einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene).

Zum Vergleich kann ein Parallelversuch aus der Optik gezeigt werden.

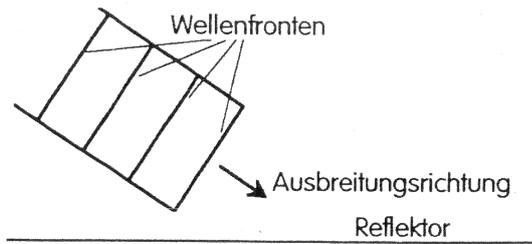
Bei der Demonstration von Wasserwellen sollte man parallele Wellenfronten erzeugen (keine Kreiswellen). Um Interferenzerscheinungen zu vermeiden, empfiehlt es sich, nur kurze Wellenzüge zu untersuchen. Es ist kaum möglich, das Reflexionsgesetz quantitativ zu untersuchen. Man kann aber zunächst einen Einfallswinkel von 45° wählen. Für

⁴⁾ Auch wenn klar ist, daß eine Schallquelle in Luft eine Kugelwelle produziert, kann man bei der Ausbreitung des Schalls in Richtung auf den Reflektor von einem Schallstrahl sprechen.

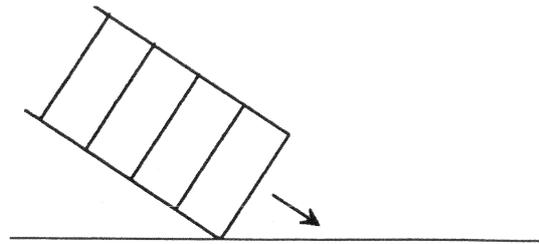
einen größeren bzw. kleineren Einfallswinkel stellen die Schülerinnen und Schüler jetzt Vermutungen über die Richtung der reflektierten Welle an. Kleine Drahtstücke können zur Kennzeichnung des Einfallslotes und der Ausbreitungsrichtung der Wasserwellen vor und nach der Reflexion in die Wellenwanne gelegt werden.

In einer Bildfolge wird die Reflexion von Wellenfronten gezeichnet (kein Huygenssches Prinzip!):

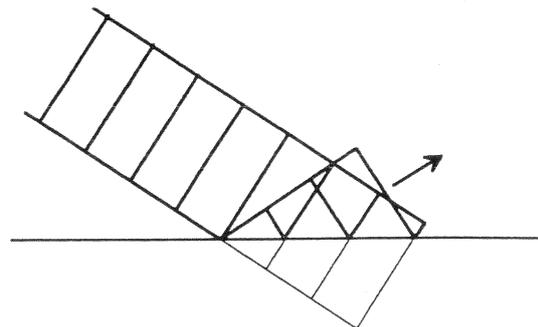
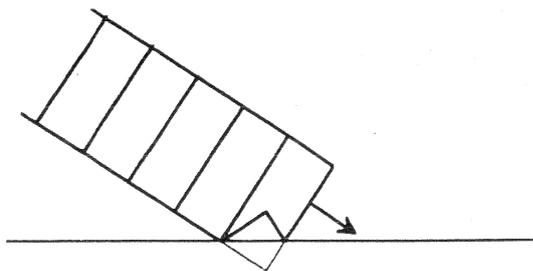
1 Die Welle läuft auf den Reflektor zu.



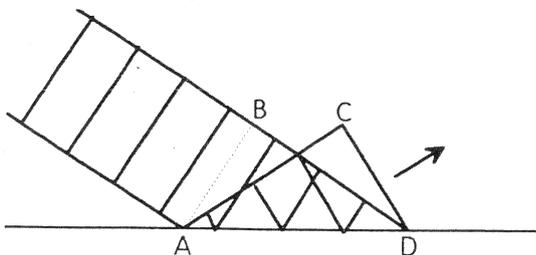
2 Die erste Wellenfront berührt den Reflektor.



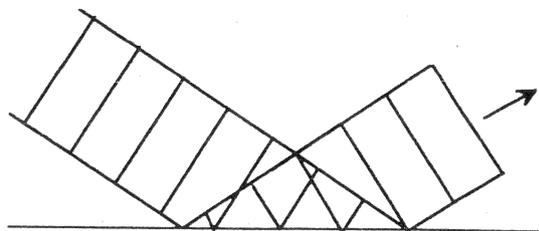
3 und 4 Ein Teil der ersten Wellenfront läuft noch auf den Reflektor zu, während der andere Teil schon reflektiert wurde.



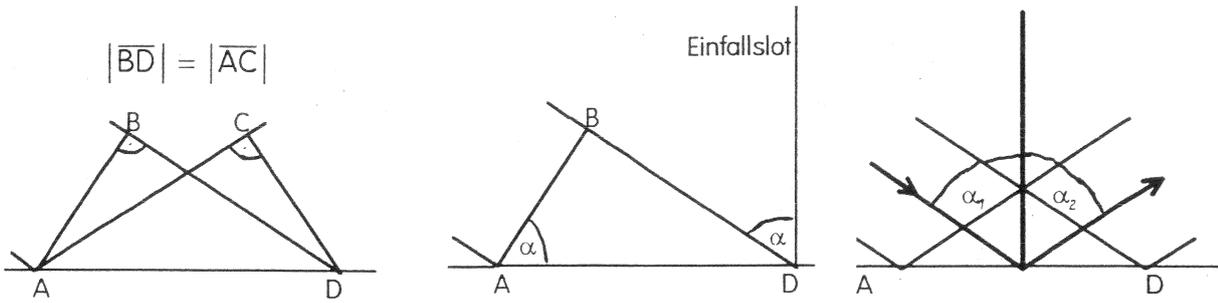
5 Während ein Wellenteil die Strecke BD zurücklegte (vor der Reflexion), hat der andere Teil schon die Strecke AC zurückgelegt (nach der Reflexion).



6 Die ersten Wellenfronten entfernen sich vom Reflektor (nach der Reflexion).



geometrische Überlegungen:



7 ähnliche Dreiecke

8 gleiche Winkel

9 Reflexionsgesetz für Wellen

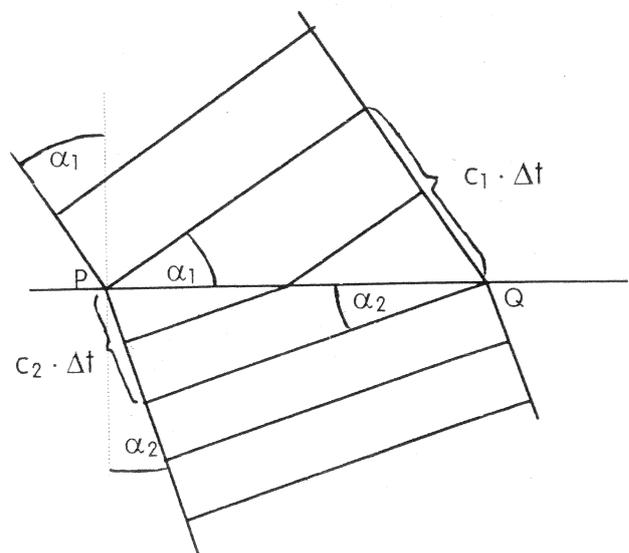
Zum Schluß dieser Unterrichtsstunde wird als technische Anwendung das Prinzip des Echolotes angesprochen.

10. Stunde:

Das Phänomen der Brechung wird mit Hilfe der schulüblichen Wellenwanne demonstriert. Man beobachtet wieder ebene Wellenfronten. Sie überqueren die Grenzfläche zwischen zwei Gebieten mit unterschiedlicher Wassertiefe. Verlaufen die Wellenfronten parallel zur Grenzfläche (Einfallswinkel 0°), so beobachtet man lediglich eine Änderung des Abstandes benachbarter Wellenfronten; bei schrägem Einfall läßt sich außerdem eine Änderung der Ausbreitungsrichtung beobachten. Damit ist das Wesentliche des Phänomens Brechung erkannt.

Für die weitere Erörterung und die Herleitung des Brechungsgesetzes ist es hilfreich, die Beobachtung in einem Wellenfrontenbild an der Tafel festzuhalten. Das Bild wird durch die Ausbreitungsrichtungen der einfallenden und der gebrochenen Welle ergänzt. Einfallswinkel (α_1) und Brechungswinkel (α_2) werden eingeführt; sie werden aufgrund geometrischer Überlegungen als Winkel zwischen Wellenfronten und Grenzfläche wiederentdeckt. Aus der Zeichnung (kein Huygensches Prinzip!) läßt sich das Brechungsgesetz ableiten:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\frac{c_1 \cdot \Delta t}{|PQ|}}{\frac{c_2 \cdot \Delta t}{|PQ|}} = \frac{c_1}{c_2}$$



An dieser Stelle des Unterrichts sollte man eine ausführliche Erörterungsphase anschließen:

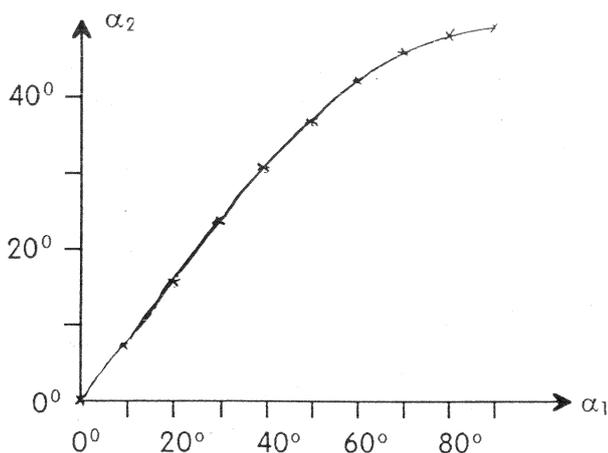
- ◆ Der Übergang der Welle in ein Gebiet mit anderer (kleinerer/größerer) Wassertiefe hat eine Veränderung (Verkleinerung/Vergrößerung) der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle zur Folge. Dies führt bei $\alpha_1 \neq 0^\circ$ zu einer Änderung der Ausbreitungsrichtung (Brechung zum Lot hin/vom Lot weg).
- ◆ Der Vorteil der Experimente mit Wasserwellen gegenüber Licht- oder Schallwellen besteht in der Beobachtbarkeit der Wellenfronten; dies hat zur Folge, daß neben der Richtungsänderung auch die Änderung der Wellenlänge beim Übergang in das Nachbarmedium beobachtet werden kann. Daher läßt sich das Brechungsgesetz auch unmittelbar mit Hilfe der Wellenlängen formulieren:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Zu diesem Ergebnis führt man die Schülerinnen und Schüler durch die einleuchtende Überlegung, daß bei einem Beobachter im flacheren Wasser (im dichteren Medium) pro Zeiteinheit ebenso viele Wellenfronten (Wellenberge) vorbeilaufen wie bei einem Beobachter im tieferen Wasser (im dünneren Medium). Offenbar schwingen die Teilchen der einfallenden und der gebrochenen Welle frequenzgleich und es gilt:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Das Brechungsgesetz ist nicht nur für Wasseroberflächenwellen gültig. Um dieses zu belegen, empfiehlt sich die Übertragung auf Lichtwellen. Überdies ist wohl den meisten Schülerinnen und Schülern in Erinnerung, daß es eine Gesetzmäßigkeit für die Brechung von Lichtstrahlen gibt. Die mit der Hartlscheibe gewonnenen α_1 - α_2 - Meßwertepaare können in einer Wertetabelle (vgl. A 2.4) oder in einem Diagramm festgehalten sein:



Für einige beliebige Wertepaare läßt sich schnell feststellen, daß zwar nicht die Winkel, aber die Sinuswerte der Winkel proportional zueinander sind. Es wird die (relative) Brechzahl n_{12} eingeführt:

$$n_{12} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$$

(Die Indizes sollen angeben, daß es sich um einen Übergang vom Medium 1 in das Medium 2 handelt).

Bemerkungen:

- Auf die Einführung absoluter Brechzahlen (für einzelne Medien) sollte verzichtet werden, da sie nur für Licht über die Normierung $n_{\text{vak}} = 1$ sinnvoll ist; für Schall- und Wasserwellen ist eine derartige Normierung unsinnig.

- In der Vorstufe sollte man bei der Begründung der Frequenzgleichheit von einfallender und gebrochener Welle auf die Vorstellungen über erzwungene Schwingung und Resonanz verzichten, da diese Begriffe noch nicht Unterrichtsgegenstand waren.

11. Stunde:

Ein wesentliches Ziel dieser Unterrichtsstunde ist es, den Umgang mit dem Brechungsgesetz zu üben.

Aufgabe A 2.6 (eventuell Hausaufgabe zu dieser Stunde) enthält auch ein Beispiel, bei dem eine Brechung nach dem Brechungsgesetz ausgeschlossen ist: Die Welle trifft aus dem dichteren Medium unter einem Einfallswinkel von 50° auf die Grenzfläche zum dünneren Medium. Die Rechnung ergibt $\sin(50^\circ) \cdot 1,5 = 1,15$; die Gleichung $\sin(\alpha_{\text{Luft}}) = 1,15$ hat keine Lösung. Die Diskussion führt zum Phänomen der Totalreflexion und zur Definition des Grenzwinkels:

$$\sin(\alpha_G) = \frac{1}{n_{12}}$$

Aus der Brechzahl läßt sich der Grenzwinkel berechnen; die experimentelle Bestimmung des Grenzwinkels liefert die Brechzahl.

Im zweiten Teil dieser Unterrichtsstunde werden Versuche zur Totalreflexion vorgeführt:

Totalreflexion beim Umkehrprisma; gebogener Glasstab als Lichtleitermodell; Lichtleiter; Versuche D 2.4.

Beispiele aus der Natur sollten erwähnt werden: Luftspiegelungen; Entstehung des Regenbogens; Zone des Schweigens (vgl. Höfling, Band 11, Teil 1).

Bemerkungen:

Die optische Informationsübertragung hat in den vergangenen 15 Jahren eine stürmische Entwicklung durchlaufen und beginnt, einige Anwendungsbereiche der elektrischen Nachrichtenübertragung zu erobern. Diese Entwicklung ist nicht nur auf den wissenschaftlichen Bereich beschränkt, sondern dringt in den Lebensbereich jedes einzelnen. Daher ist es sinnvoll, in der Schule die optische Informationstechnologie zu thematisieren. Dieses kann im Rahmen der ITB oder im Ergänzungskurs Physik geschehen. Wenn Zeit vorhanden ist, kann im Rahmen des Pflichtkurses „Wellen“ auf einige Aspekte der optischen Informationsübertragung eingegangen werden.

Dieses Thema bietet die Möglichkeit

1. zur Wiederholung und Vertiefung von Strahlen- und Wellenoptik,
2. zur Behandlung einer aktuellen Anwendung,
3. für historische Betrachtungen (Verdrängung der optischen durch die elektrische Telegraphie, ca. 1850; Renaissance der optischen Informationstechnik, ca. 1975),
4. zu Technologievergleichen,
5. zur Vorbereitung von Aspekten der Quantenphysik, bzw. für Ausblicke auf Aspekte der Quantenphysik (Dämpfungsmechanismen in Lichtleitern, Monomode-Fasern),

6. für Schülerreferate, z.B. zu den Themen:

- elektrooptische Wandler
- Aufbau von Lichtleiterkabeln und Faserstruktur
- Einsatzmöglichkeiten von Lichtleitern (Übertragung von Kaltlicht, Mehrfachbeleuchtung, Überwachungssysteme, Breitbandkommunikation, medizinische und technische Endoskope, flexible Sichtgeräte),

7. für experimentelle Aufgaben, z.B. zu den Themen:

- Störung der Totalreflexion durch Oberflächeneffekte (Mantelproblem der Faserstruktur),
- Störung der Totalreflexion durch Krümmung des Lichtleiters,
- Lichtgeschwindigkeit im Lichtleiter,
- Dämpfung im Lichtleiter,
- Laufzeiten in Abhängigkeit vom Gradientenprofil (Computersimulation).

8. für theoretische Untersuchungen, z.B. zu den Themen:

- Berechnung der numerischen Apertur,
- Deutung der Streuung und Absorption,
- Laufzeitstreuung und Lichtwege in Stufenleitern.

Unterrichtsnahе Lehrerinformationen zu diesem Thema findet man bei:

H. G. Unger: „Lumineszenzdioden und Halbleiterlaser“, Physikalische Blätter 34 (1978), S. 631,

D. Rosenberger: „Optische Informationsübertragung mit Glasfasern“, Physik in unserer Zeit 8 (1977), S. 3,

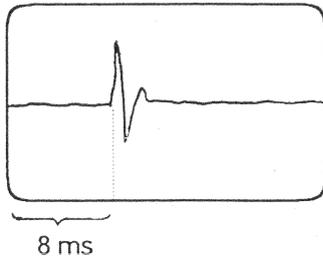
K. Arnolds: „Faseroptik - Anregungen zur unterrichtlichen Behandlung der physikalischen Grundlagen einer modernen Technologie“, Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 26 (1978), S. 257,

K. Arnolds: „Informationsübertragung mit Lichtleitern“, Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 28 (1980), S. 177.

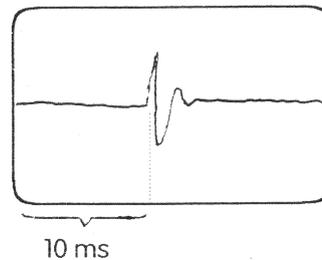
D 2.2 (Fortsetzung)

Wird das Oszilloskop mit der Rechteckspannung getriggert, so erscheint auf dem Schirm ein stehendes Bild. Die Laufzeit des Schalls vom Lautsprecher zum Mikrophon lässt sich am Oszilloskop ablesen. Mit diesem Versuch wurde die Laufzeit des Schalls in CO₂ gemessen (vgl. Aufgabe 1.12).

Oszilloskop-Bild: Luft



Oszilloskop-Bild: CO₂



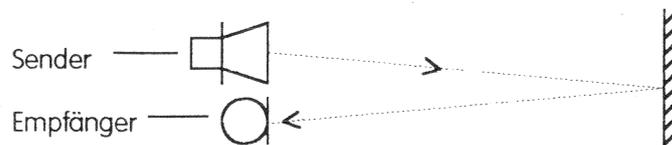
$$c_{(25^{\circ}\text{C})} = 346 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad t = 8 \text{ ms}$$

$$s = 2,77 \text{ m (mit Sonderrohr)}$$

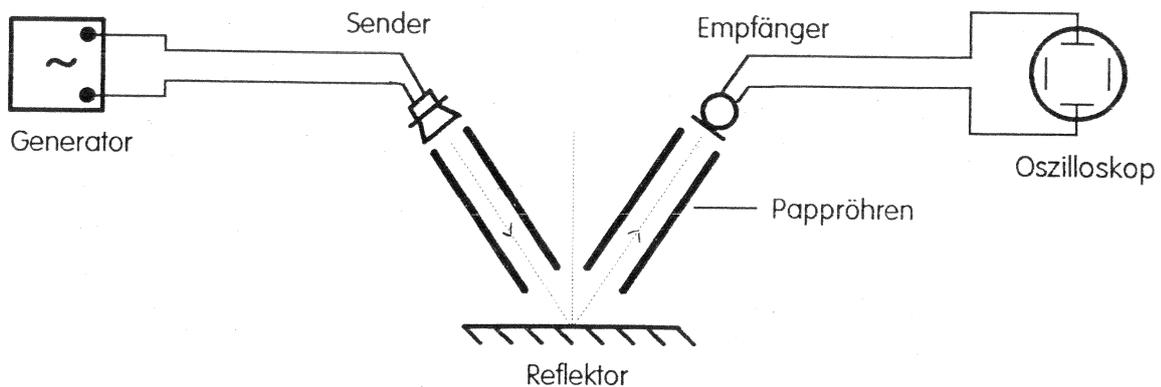
$$c_{(25^{\circ}\text{C})} = \frac{2,77 \text{ m}}{10 \text{ ms}} = 277 \frac{\text{m}}{\text{s}}^5)$$

D 2.3 Reflexion von Ultraschallwellen

Die Reflexion von Ultraschallwellen lässt sich problemlos untersuchen.



Den einfallenden und den reflektierten Schallstrahl kann man auch durch Pappröhren laufen lassen. Wenn die Lage des Einfallslotes zusätzlich durch eine Stativstange gekennzeichnet wird, lassen sich Einfallswinkel und Reflexionswinkel veranschaulichen.



Hinweis: In der Versuchsbeschreibung „Versuche mit Ultraschall“ der Firma Leybold Didactic wird die Reflexion an heißen Luftschichten beschrieben. Dort ist auch der Aufbau zum Nachweis der Brechung von Ultraschallwellen an der Grenzfläche CO₂ - Luft angegeben.

⁵⁾ Literaturwert für 25°C: 272 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

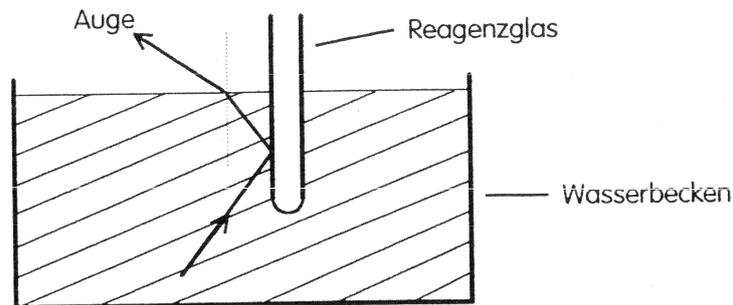
D 2.4 Totalreflexion und Lichtleiter

Reagenzglas im Wasserbecken:

Sieht man unter einem bestimmten Winkel (ausprobieren!) schräg von oben auf ein leeres Reagenzglas im Wasserbecken, so erscheint das Reagenzglas silberglänzend. Es ist undurchsichtig. Ein kleiner Nagel im Reagenzglas ist unsichtbar. Das Licht wird am luftgefüllten Reagenzglas totalreflektiert.

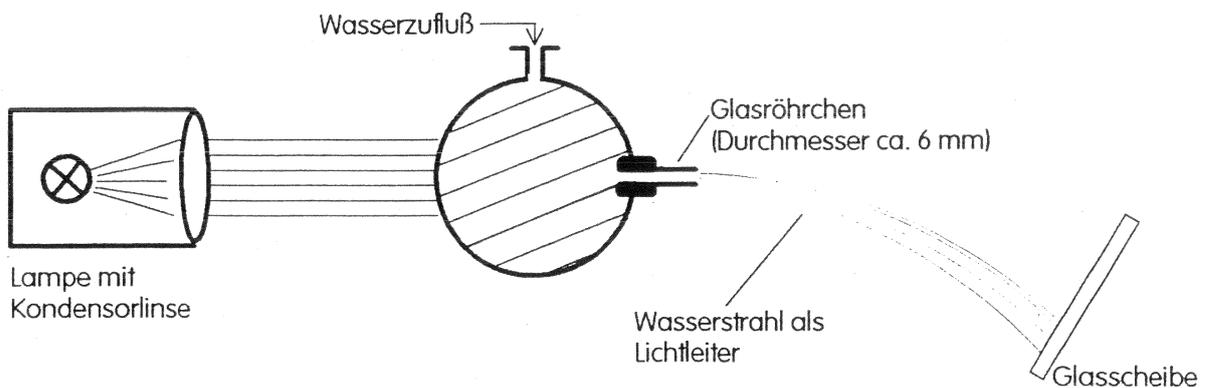
(Sieht man von der Seite durch das Wasserbecken, ist der Nagel zu sehen. Diese Blickrichtung auf das Reagenzglas läßt sich durch Verkleiden des Wasserbeckens unterbinden.)

Füllt man Wasser in das Reagenzglas, so wird es durchsichtig. Der Nagel ist wieder sichtbar.

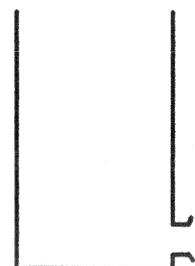


Wasserstrahl als Lichtleiter:

Der folgende Versuch zeigt, daß Licht im gekrümmten Wasserstrahl „geleitet“ werden kann. Das Licht wird an der Grenzfläche Wasser - Luft mehrfach totalreflektiert. Am Boden des Wasserbeckens oder auf einer in den Wasserstrahl gehaltenen Glasscheibe ist deutlich ein Lichtfleck zu sehen.



Als Glasgefäß kann auch ein zylindrisches Glasgefäß mit Ausflußöffnung in Bodennähe verwendet werden.



2.5 Aufgabenbeispiele

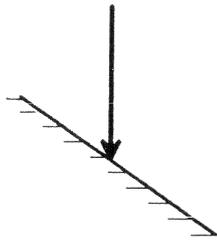
A 2.1 Eine Welle trifft auf eine Wand und wird reflektiert. Wie kann durch Errichten einer zweiten Wand erreicht werden,

a) daß sich die Welle weiter in der ursprünglichen Richtung ausbreiten kann?

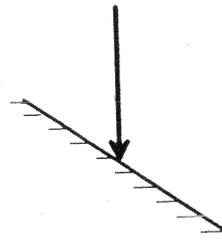
b) daß die Welle in die ursprüngliche Richtung zurückläuft?

Zeichnen Sie jeweils eine Lösungsmöglichkeit.

Zu a)



zu b)



A 2.2 Der Mensch kann Schallempfindungen nur dann deutlich getrennt wahrnehmen, wenn ihr zeitlicher Abstand mindestens 0,1 s beträgt. Wie weit muß eine Felswand mindestens vom Beobachter entfernt sein, damit er ein deutliches Echo hören kann?

A 2.3 Mit Hilfe eines Echolotes soll die Wassertiefe bestimmt werden. Ein Erreger befindet sich unmittelbar unter der Wasseroberfläche. Er sendet eine Schallwelle ($f = 800 \text{ Hz}$) aus. Nach $t = 6 \text{ s}$ trifft der am Boden reflektierte Schall wieder beim Erreger ein.

a) Wie groß ist die Wassertiefe, wenn die Schallgeschwindigkeit im Wasser $1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt?

b) Wie groß ist die Wellenlänge der verwendeten Schallwellen in Wasser?

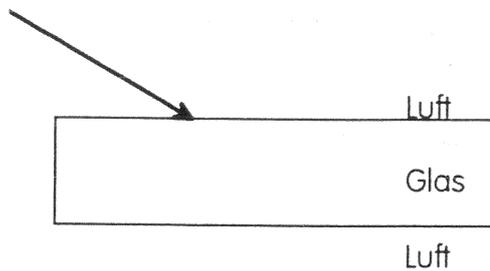
c) Diese Schallwellen gelangen durch die Wasseroberfläche und befinden sich jetzt in Luft. Wie groß sind jetzt Frequenz, Wellenlänge und Geschwindigkeit?

A 2.4 Berechnen Sie für die Brechung von Licht die Brechungszahlen aus den folgenden Meßwerten. Für den Übergang Luft - Glas und für den Übergang Luft - Wasser sind mehrere Einfallswinkel (α_1) und Brechungswinkel (α_2) gegeben.

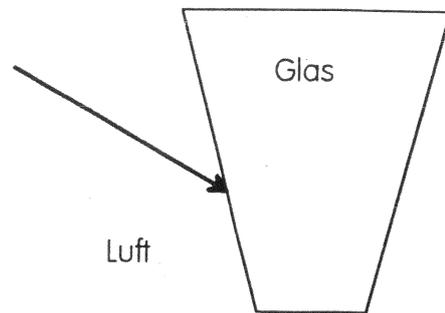
Einfallswinkel α_1 in Luft	Brechungswinkel α_2		Brechungszahlen	
	in Glas	in Wasser	Luft-Glas	Luft-Wasser
20°	$13,0^\circ$	$15,0^\circ$		
40°	$25,5^\circ$	$28,5^\circ$		
60°	$35,0^\circ$	$41,0^\circ$		
80°	$41,0^\circ$	$47,5^\circ$		

A 2.5 Skizzieren Sie in den folgenden Zeichnungen den weiteren Verlauf des Lichtstrahls.

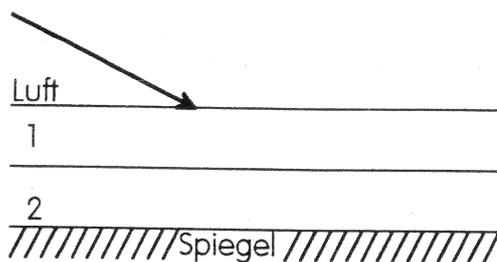
a)



b)

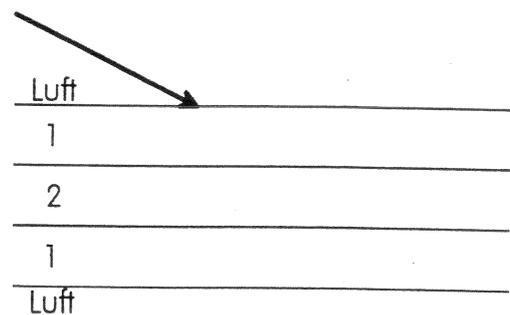


c) Die optische Dichte der Schichten soll nach unten zunehmen. An der unteren Grenzfläche von Schicht 2 wird das Licht reflektiert.



d) Für die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Schichten soll gelten:

$$v_{\text{Luft}} > v_1 > v_2$$

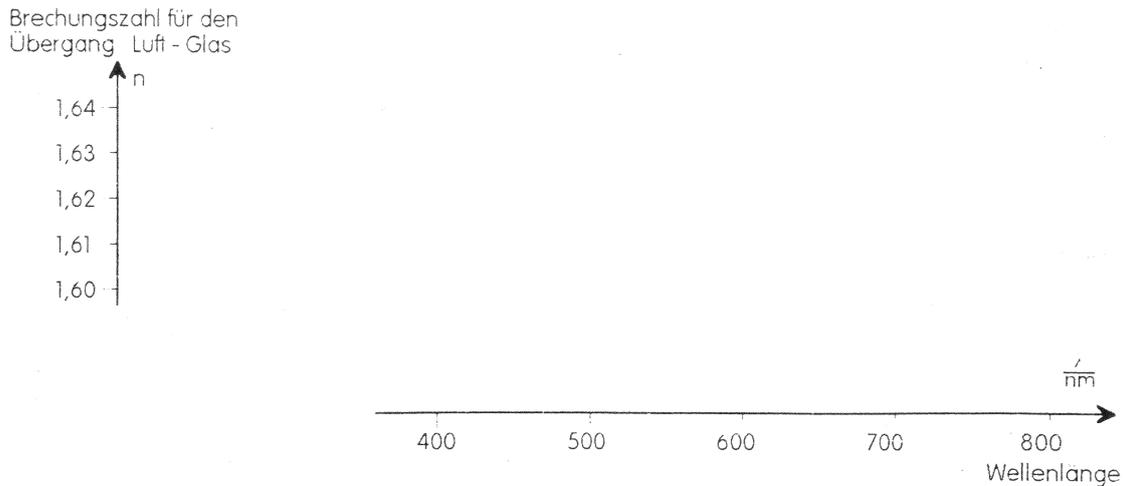


A 2.6 Ergänzen Sie die folgende Tabelle. Alle Angaben beziehen sich auf die Brechung von Licht.

Übergang	Einfallswinkel	Brechungswinkel	Brechungszahl für den Übergang Luft-Glas
Luft-Glas	35,0°		1,50
Glas-Luft	35,0°		1,50
	15,9°	24,5°	
	24,5°	38,8°	
Glas-Luft	0,0°		1,50
Luft-Glas	50,0°		1,50
Glas-Luft	50,0°		1,50

A 2.7 Die Brechungszahl für den Übergang Luft - Glas hat nicht für alle Lichtsorten denselben Wert. Begründen Sie diese Aussage.
Was bedeutet diese Aussage für die Lichtgeschwindigkeit in Glas?

A 2.8 Das folgende Diagramm gilt für eine bestimmte Glassorte:



- a) Interpretieren Sie dieses Diagramm.
- b) Skizzieren Sie ein zugehöriges Diagramm für die Abhängigkeit der Brechungszahl von der Frequenz.
- c) Berechnen Sie für den Einfallswinkel von 60° die Differenz der Brechungswinkel für rotes Licht ($\lambda_{\text{rot}} = 750 \text{ nm}$) und blaues Licht ($\lambda_{\text{blau}} = 450 \text{ nm}$).

A 2.9 In einer Wellenwanne läuft eine Welle aus einem tieferen Gebiet in ein Gebiet mit flacherem Wasser. Der Einfallswinkel betrage 60° , der Brechungswinkel sei 45° .

- a) Bestimmen Sie das Verhältnis der Geschwindigkeiten in beiden Teilen der Wellenwanne.
- b) Bestimmen Sie die Geschwindigkeit im tieferen Teil der Wellenwanne, wenn sie im flachen Teil $20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ beträgt.

A 2.10 In einer Wellenwanne läuft eine Welle aus einem flacheren Gebiet in ein Gebiet mit tieferem Wasser. Der Einfallswinkel betrage 45° , der Brechungswinkel sei 60° .

- a) Bestimmen Sie das Verhältnis der Geschwindigkeiten in beiden Teilen der Wellenwanne.
- b) Bestimmen Sie die Geschwindigkeit im flachen Teil der Wellenwanne, wenn sie im tieferen Teil $25 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ beträgt.

A 2.11 a) Was versteht man nach Definition unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion?

- b) Wie läßt sich dieser Grenzwinkel experimentell bestimmen?
- c) Wie läßt sich dieser Grenzwinkel mit Hilfe der Brechungszahl berechnen?

A 2.12 Licht trifft auf die Grenzfläche Wasser - Luft. Für den Übergang Luft - Wasser beträgt die Brechungszahl 1,33. Der Einfallswinkel (im Wasser!) beträgt 20° .

- Wie groß ist der Brechungswinkel?
- Ein geringer Teil des Lichtes wird auch reflektiert. Wie groß ist der Reflexionswinkel?
- Wie groß darf der Einfallswinkel maximal sein, damit gerade noch Brechung auftritt?

Jetzt trifft eine Schallwelle auf die Grenzfläche Wasser - Luft. Die Schallgeschwindigkeit beträgt in Luft $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, in Wasser $1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der Einfallswinkel (im Wasser) soll wieder 20° sein.

- Wie groß ist der Brechungswinkel?
- Wie groß darf jetzt der Einfallswinkel maximal sein, damit gerade noch Brechung auftritt?

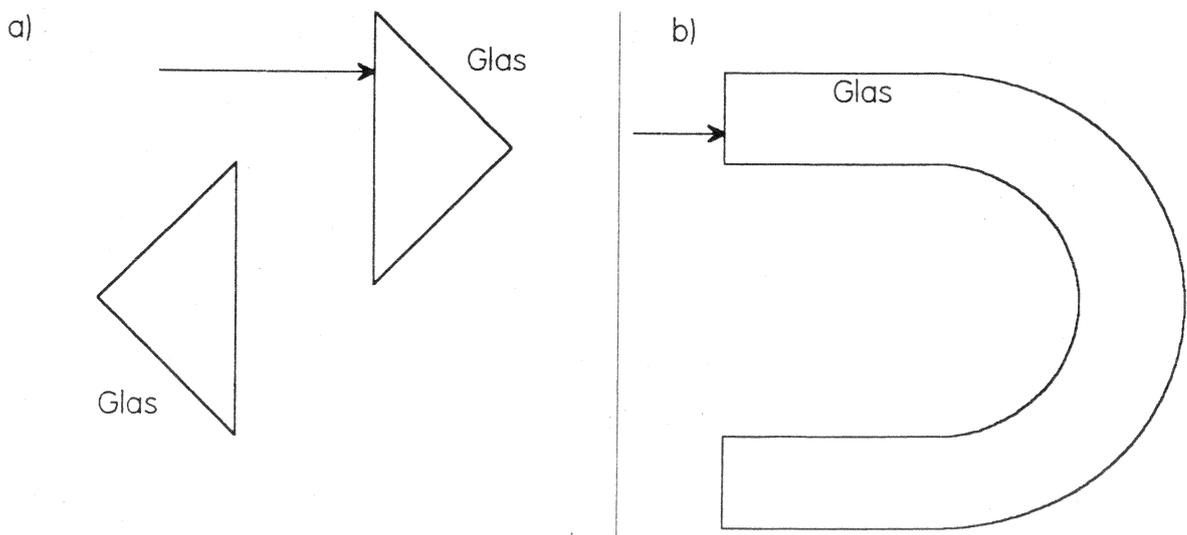
A 2.13 Licht trifft auf die Grenzfläche Luft - Wasser. Für den Übergang Luft - Wasser beträgt die Brechungszahl 1,33. Der Einfallswinkel (in Luft!) beträgt 10° .

- Wie groß ist der Brechungswinkel?
- Ein geringer Teil des Lichtes wird auch reflektiert. Wie groß ist der Reflexionswinkel?
- Wie groß darf der Einfallswinkel maximal sein, damit gerade noch Brechung auftritt?

Jetzt trifft eine Schallwelle auf die Grenzfläche Luft - Wasser. Die Schallgeschwindigkeit beträgt in Luft $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, in Wasser $1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der Einfallswinkel (in Luft) soll wieder 10° sein.

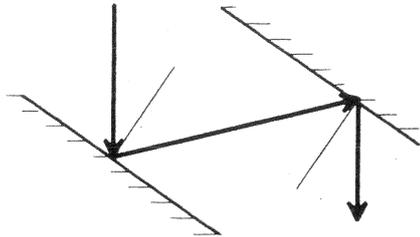
- Wie groß ist der Brechungswinkel?
- Wie groß darf jetzt der Einfallswinkel maximal sein, damit gerade noch Brechung auftritt?

A 2.14 Zeichnen Sie in den folgenden Zeichnungen den weiteren Verlauf der Lichtstrahlen:

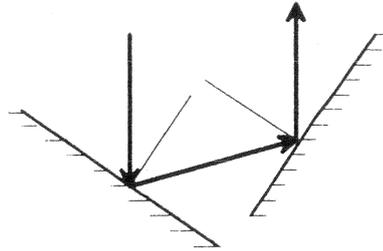


Lösungen

zu A 2.1 a) Die beiden Wände müssen parallel zueinander sein.



b) Die beiden Wände müssen im rechten Winkel zueinander stehen.



zu A 2.2 Aus Schallgeschwindigkeit und Laufzeit ergibt sich der Weg s . Die gesuchte Entfernung e ist der halbe Weg:

$$e = 0,5 \cdot s = 0,5 \cdot c \cdot t = 0,5 \cdot 340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,1\text{s} = 17\text{m}$$

zu A 2.3 a) $e = 4350 \text{ m}$ (vgl. A 2.2)

b) $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{800 \text{ Hz}} = 1,81 \text{ m}$

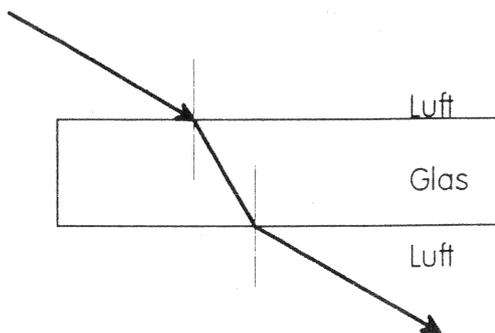
c) Die Frequenz ändert sich nicht: $f = 800 \text{ Hz}$.

Wenn man von einer Schallgeschwindigkeit in Luft von $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ausgeht, ergibt sich für die Wellenlänge $\lambda = 0,425 \text{ m}$.

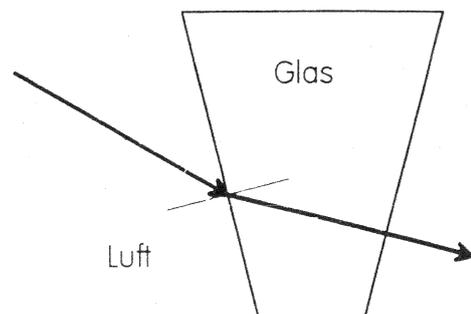
zu A 2.4

Einfallswinkel α_1 in Luft	Brechungswinkel α_2		Brechungszahlen	
	in Glas	in Wasser	Luft-Glas	Luft-Wasser
20°	$13,0^\circ$	$15,0^\circ$	1,520	1,321
40°	$25,5^\circ$	$28,5^\circ$	1,493	1,347
60°	$35,0^\circ$	$41,0^\circ$	1,510	1,320
80°	$41,0^\circ$	$47,5^\circ$	1,501	1,336
	Mittelwerte:		1,51	1,33

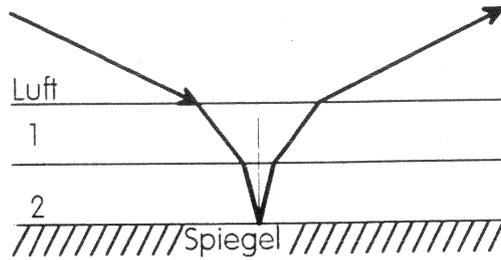
zu A 2.5 a)



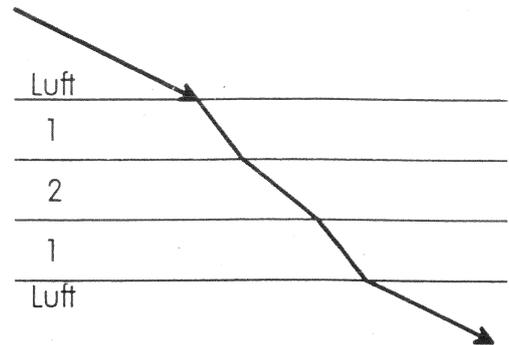
b)



zu A 2.5 c)



d)



zu A 2.6

Übergang	Einfallswinkel	Brechungswinkel	Brechungszahl für den Übergang Luft-Glas
Luft-Glas	35,0°	22,5°	1,50
Glas-Luft	35,0°	59,4°	1,50
Glas-Luft	15,9°	24,5°	1,51
Glas-Luft	24,5°	38,8°	1,51
Glas-Luft	0,0°	0,0° ⁶⁾	1,50
Luft-Glas	50,0°	30,7°	1,50
Glas-Luft	50,0°	--- ⁷⁾	1,50

zu A 2.7 Wenn bei der Brechung z.B. bei einem Prisma Spektralfarben entstehen, müssen für die verschiedenen Lichtsorten (verschiedene Wellenlänge) unterschiedliche Brechungszahlen gelten. Da die Lichtwellen im Vakuum (angenähert auch in Luft) eine einheitliche Geschwindigkeit haben, müssen sie im Glas unterschiedlich schnell sein.

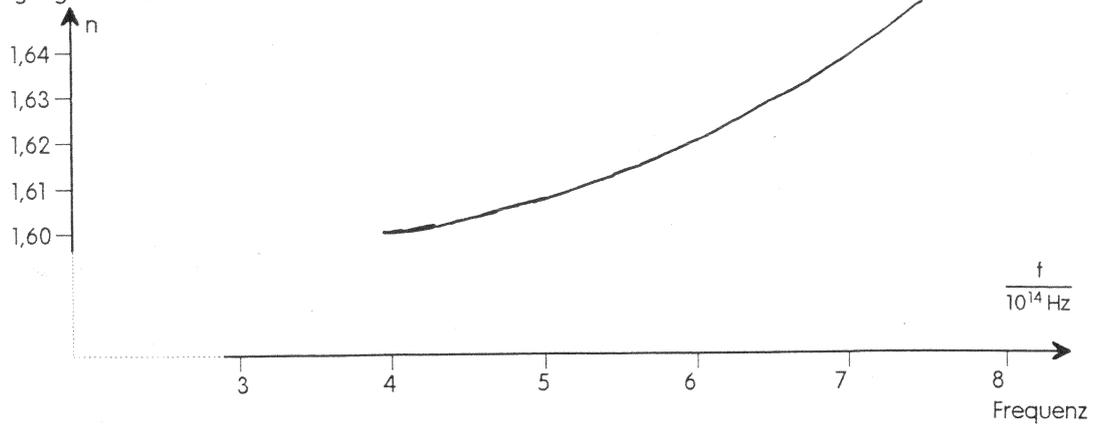
zu A 2.8 Die Werte, die diesem Diagramm zugrunde liegen, stammen aus: *Kohlrausch: Praktische Physik 3*. Sie beziehen sich auf Jenaer Glas (F3).

a) Das Diagramm zeigt, daß für blaues Licht eine größere Brechungszahl gilt als für rotes Licht. Blaues Licht wird stärker gebrochen, der Brechungswinkel ist bei gleichem Einfallswinkel kleiner.

⁶⁾ Das Brechungsgesetz gilt auch für den senkrechten Lichteinfall, wenn es in folgender Form geschrieben wird: $\sin \alpha_1 = n_{12} \cdot \sin \alpha_2$.

⁷⁾ Wenn der Winkel in Glas 50° beträgt, kann keine Brechung stattfinden. Das Licht wird an der Grenzfläche reflektiert.

zu A 2.8 b) Brechungs­zahl für den Übergang Luft - Glas



c) Die Brechungs­zahlen lassen sich aus dem Diagramm ablesen. Die Winkel ergeben sich mit Hilfe des Brechungsgesetzes:

$$n_{\text{rot}} = 1,603; \alpha_{2,\text{rot}} = 32,7^\circ;$$

$$n_{\text{blau}} = 1,630; \alpha_{2,\text{blau}} = 32,1^\circ; \Delta\alpha_2 = 0,6^\circ.$$

zu A 2.9 a) $\frac{\sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} = 1,22$ b) $c_{\text{tief}} = 1,22 \cdot c_{\text{flach}} = 1,22 \cdot 20 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 24,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

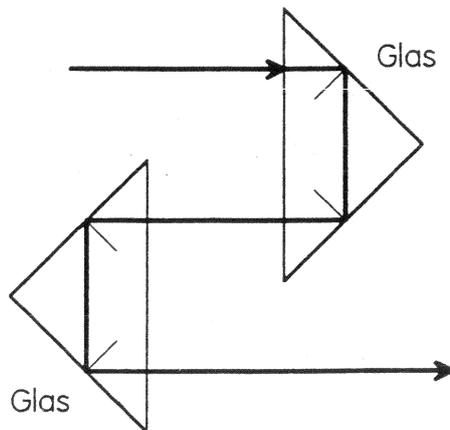
zu A 2.10 a) $\frac{\sin 45^\circ}{\sin 60^\circ} = 0,816$ b) $c_{\text{flach}} = 0,816 \cdot c_{\text{tief}} = 0,816 \cdot 25 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 20,4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

- zu A 2.11 a) Totalreflexion tritt an der Grenzfläche zwischen einem dichteren und einem dünneren Medium auf. Der Grenzwinkel ist der kleinste Einfallswinkel im dichteren Medium, bei dem keine Brechung auftritt.
- b) Man bestimmt den Grenzwinkel der Totalreflexion, indem man den Einfallswinkel im dichteren Medium solange erhöht, bis keine Brechung mehr auftritt.
- c) Wenn gerade keine Brechung auftritt, liegt im dünneren Medium ein Winkel von 90° vor: $\frac{\sin 90^\circ}{\sin \alpha_G} = \frac{1}{\sin \alpha_G} = n_{12}$
 Der Sinus des Grenzwinkels ist der reziproke Wert der Brechungs­zahl.

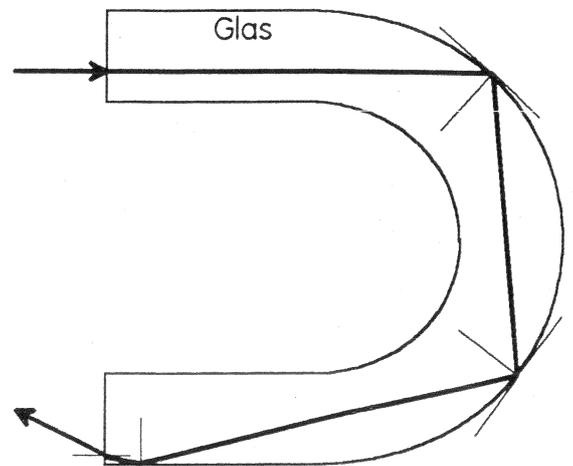
- zu A 2.12 a) $\sin \alpha_L = 1,33 \cdot \sin \alpha_W = 1,33 \cdot \sin 20^\circ = 0,455$, also ist $\alpha_L = 27,1^\circ$.
- b) Der Reflexionswinkel beträgt 20° .
- c) Gefragt ist nach dem Grenzwinkel der Totalreflexion. Er beträgt hier: $\alpha_G = 48,8^\circ$.
- d) $\frac{\sin \alpha_L}{\sin \alpha_W} = \frac{\sin \alpha_L}{\sin 20^\circ} = \frac{340}{1480} \Rightarrow \sin \alpha_L = 0,0786 \Rightarrow \alpha_L = 4,51^\circ$.
- e) Der Einfallswinkel im Medium mit der größeren Geschwindigkeit darf 90° betragen.

- zu A 2.13
- $\sin \alpha_W = \frac{\sin \alpha_L}{1,33} = \frac{\sin 10^\circ}{1,33} = 0,13$, also ist $\alpha_W = 7,50^\circ$.
 - Der Reflexionswinkel beträgt 10° .
 - Der Einfallswinkel im Medium mit der größeren Geschwindigkeit darf 90° betragen.
 - $\frac{\sin \alpha_L}{\sin \alpha_W} = \frac{\sin 10^\circ}{\sin \alpha_W} = \frac{340}{1480} \Rightarrow \sin \alpha_W = 0,756 \Rightarrow \alpha_W = 49,1^\circ$.
 - Gefragt ist nach dem Grenzwinkel der Totalreflexion. Er beträgt hier: $\alpha_G = 13,3^\circ$.

zu A 2.14 a)



b)



3. Überlagerung von Wellen: Zweistrahlinterferenz

3.1 Inhalte

- Verstärkung, Abschwächung, Auslöschung
- Maxima, Minima
- Gangunterschied
- gleichphasig, gegenphasig
- Wellenlängenbestimmung

Bemerkungen:

Es werden hier nur Interferenzerscheinungen behandelt, die nicht durch Beugung entstehen. Beugung wird erst in einem späteren Unterrichtsabschnitt thematisiert! Die Zweistrahlinterferenz wird wieder in verschiedenen Phänomenbereichen untersucht. Für die Schülerinnen und Schüler zeigt Licht hier zum ersten Mal Welleneigenschaften. Die mathematische Behandlung von Phase und Phasendifferenz wird nicht durchgeführt.

3.2 Unterrichtsgang

12. Stunde: Interferenzrohr
13. Stunde: Interferenz von Wasserwellen
14. Stunde: Interferenz von Schall-, Ultraschallwellen
15. Stunde: Bestimmung der Wellenlänge aus Interferenzversuch
16. Stunde: Interferenz beim Biprisma
17. Stunde: Abschätzen der Wellenlänge von sichtbarem Licht

3.3 Hinweise zu den Stunden

12. Stunde:

Der Interferenzversuch nach Quincke (vergleiche D 3.1) kann als Einstiegsversuch in den Themenbereich „Überlagerung von Wellen“ eingesetzt werden. Er unterscheidet sich vom Aufbau her deutlich von den folgenden Versuchen zur Zweistrahlinterferenz, aber hier werden einige grundlegende Begriffe unmittelbar deutlich.

Der Versuch wird durchgeführt. Zunächst können Schülerinnen oder Schüler am Ausgang des Rohres Lautstärkeänderungen hören und ihre Wahrnehmung beschreiben.

Mit Hilfe von Mikrofon und Oszilloskop (vgl. D 3.1) wird der Versuch für alle gleichzeitig beobachtbar.

Bei der Beschreibung des Versuches wird herausgearbeitet, daß durch die Konstruktion des Rohres zwei Teilwellen erzeugt werden, die auf unterschiedlichen Wegen vom

Eingang des Rohres zum Ausgang laufen. Es kommt zu einer Überlagerung der Teilwellen (Interferenz), die am Ausgang beobachtet wird.

Die Schülerinnen und Schüler werden Vermutungen darüber anstellen, weshalb die am Ausgang untersuchten Schwingungen (je nach konkreter Versuchsdurchführung) unterschiedliche Amplituden haben können. Man spricht von Verstärkung und Abschwächung. Die beiden Schwingungen, die aufgrund der Teilwellen am Ausgang entstehen würden, bestehen nicht nebeneinander, sie bewirken gemeinsam eine Schwingung bestimmter Luftteilchen. Bei Addition der Auslenkungen der beiden Teilschwingungen zum gleichen Zeitpunkt sind Verstärkung oder Abschwächung zu erklären.

Die Erklärung des Interferenzversuches nach Quincke ist nun nicht mehr schwer. Aufgrund der unterschiedlichen Wege der beiden Teilwellen und aufgrund der Möglichkeit, die Wegdifferenz (den Gangunterschied) beliebig einzustellen, können die beiden Teilschwingungen in ihrer Phasenlage beliebig gegeneinander verändert werden.

Die gleichen Verhältnisse für die Addition der Teilschwingungen erhält man wieder, wenn man den Gangunterschied um eine Wellenlänge vergrößert oder verkleinert.

Jetzt kann die Frage behandelt werden, wie man mit Hilfe dieses Versuches die Wellenlänge der verwendeten Schallwellen messen kann. Man stellt das Interferenzrohr so ein, daß sich am Ausgang eine Schwingung mit maximaler (oder minimaler) Amplitude ergibt. Aus der Verschiebung des beweglichen Teiles des Rohres bis zum nächsten Maximum (oder Minimum) ergibt sich unmittelbar die Wellenlänge. Zur Überprüfung der hier angestellten Überlegungen wird man die Wellenlänge auch aus der Frequenz des Tongebers und aus der bekannten Schallgeschwindigkeit bestimmen.

Die Addition zweier Schwingungen wird an einem Beispiel ausführlich behandelt (vgl. A 3.1). Eventuell genügt es auch, den Schülerinnen und Schülern die Lösung zu Aufgabe A 3.1 zu geben. Weitere Beispiele sind dann als Hausaufgabe zu bearbeiten (A 3.2).

Bemerkungen:

- Die Theorie des Interferenzrohres ist komplizierter als sie hier dargestellt wird. Im Rohr bildet sich eine stehende Welle aus. Im Unterricht der Vorstufe sollte darauf nicht eingegangen werden. (Vgl. z.B. Höfling: Physik, Band II, Teil 1, Seite 249.)
- **Georg Hermann Quincke** (19.11.1834 Frankfurt/Oder, 13.1.1924 Heidelberg) studierte 1852 bis 1858 in Berlin, Königsberg und Heidelberg; er wurde 1875 zum ordentlichen Professor für Physik in Heidelberg berufen. Er untersuchte u. a. die Erscheinungen der Kapillarität und Oberflächenspannung, die optischen und elektrischen Eigenschaften der Metalle und die Interferenz- und Polarisationserscheinungen beim Licht. Seine Arbeit „Über Interferenzapparate für Schallwellen“ ist 1866 in Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, Band 128, S.177 - 193, veröffentlicht.

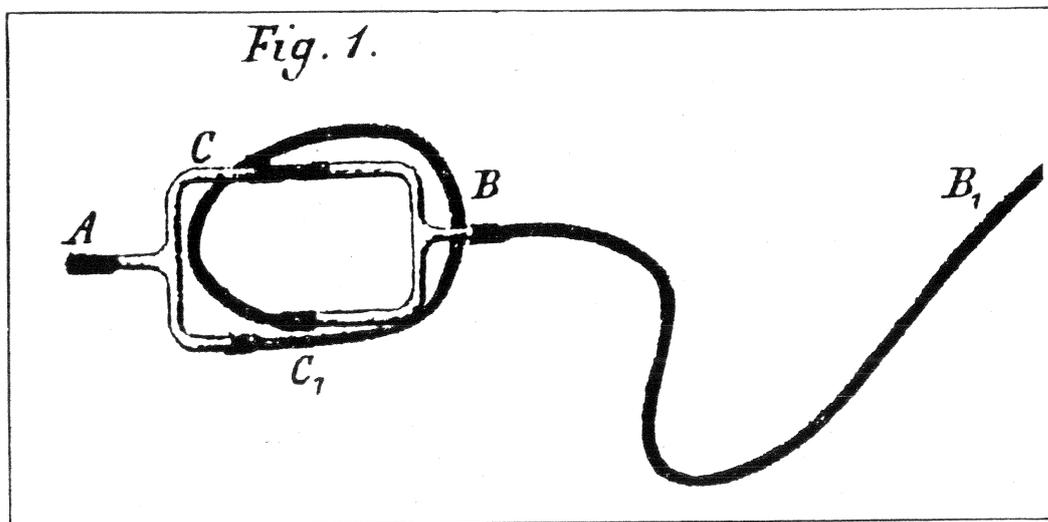
Zur Vorgeschichte des Versuches:

Anfang des 19. Jahrhunderts hatten **Savart** und **Seebeck** gezeigt, daß die direkten Wellen einer Schallquelle mit den reflektierten interferieren können. Außer diesen Versuchen, welche sich auf die Schallausbreitung in einem Raum mit drei Dimensionen beziehen, hatte **J. F. W. Herschel**, Sohn des Uranus-Entdeckers Sir Friedrich Wilhelm Herschel, 1834 einen Versuch für die Interferenz von Schallstrahlen vorgeschlagen, die sich nur in einer Richtung, nämlich in verzweigten Rohrleitungen, fortpflanzen. Versuche zur Realisierung dieses Vorschlags führte u.a. **Nörrenberg** aus, indem er Orgel-

pfeifen mit einem aus zwei Zweigen verschiedener Länge bestehenden Pfeifenrohr mit einer Labialpfeife anblies. Er vernahm verschiedene Klänge, je nachdem, ob die Luftschwingungen in einem einzelnen Zweig oder in beiden gleichzeitig erregt wurden. **E. Mach** benutzte 1865 ein solches Nörrenbergsches Röhrensystem, um den Grundton im Klang einer Stimmgabel oder in der menschlichen Stimme zu schwächen.

Zur Durchführung des Versuches:

Quincke bekennt sich bei der Beschreibung seiner akustischen Apparaturen ausdrücklich dazu, daß sie „zum Theil nichts weiter als eine Ausführung der von Herschel angegebenen Idee sind. Dieselben können leicht von Jedermann hergestellt werden, und sind nicht bloß für Klänge von Orgelpfeifen anwendbar, sondern auch für Klänge von Stimmgabeln, Saiten oder eines anderen tönenden Körpers. Sie löschen Töne von bestimmter Schwingungsdauer in derselben Weise aus, wie dünne Platten durchsichtiger Substanzen bestimmte Lichtfarben auslöschen.“



Er beschreibt einen Apparat, der dazu bestimmt ist, den Grundton einer gewöhnlichen a_1 -Stimmgabel ($f = 440 \text{ Hz}$) auszulöschen. Zwei T-förmige Glasröhren CAC_1 und CBC_1 sind an den Enden rechtwinklig umgebogen und bei C durch einen kurzen, bei C_1 durch einen 390 mm längeren Kautschukschlauch verbunden. Der Wegunterschied ist also ziemlich genau gleich einer halben Wellenlänge von Schallwellen des Tones a_1 in Luft von etwa 20°C :

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2 \cdot f} = \frac{343,5 \text{ m}}{2 \cdot \text{s} \cdot 440 \text{ Hz}} = 0,390 \text{ m}$$

Das mit einem kurzen Kautschukrohr versehene Ende A des Apparates setzt man in den äußeren Gehörgang des einen Ohres, verstopft das andere mit einem Siegellackpfropfen (so Quincke!) und läßt den Klang der Stimmgabel durch den langen Kautschukschlauch BB_1 und die verzweigte Rohrleitung ins Ohr gelangen, indem man die Zinken der angeschlagenen Gabel vor das offene Ende B_1 des Schlauches hält oder auch den Stiel der Gabel in den Schlauch steckt und die Gabel dann anschlägt.

Der Grundton a_1 ist in A nicht zu hören, dagegen die Oktave a_2 des Grundtons der Stimmgabel. „Im allgemeinen wird man über die Intensität derselben erstaunt seyn, da

es selbst geübten Ohren sehr schwer ist, die Oktave neben dem Grundton der Stimmgabel zu erkennen." Übrigens ist die Oktavschwingung einer Stimmgabel schon 1856 von Helmholtz beobachtet worden. Drückt man in der Quinckeschen Anordnung den Kautschukschlauch bei C oder bei C_1 mit den Fingern zu, so daß der Schall nur auf einem Wege ins Ohr gelangen kann, so wird der Grundton a_1 laut zu hören und seine Oktave kaum noch wahrzunehmen sein.

Hinweis für den Unterricht:

Natürlich läßt sich der Versuch nach der obigen Beschreibung für die Schule nachbauen. Wir können aber auch das schulübliche Interferenzrohr nach Quincke verwenden. Der bewegliche Teil des Rohres (vgl. D 3.1) wird 19,5 cm herausgezogen ($2 \cdot 19,5 \text{ cm} = 39 \text{ cm}$), die angeschlagene Stimmgabel wird vor den Trichter am Eingang des Rohres gehalten. Auf den Ausgang des Rohres steckt man einen Hörschlauch. Das freie Ende dieses Schlauches wird in ein Ohr gehalten, das andere Ohr wird mit einem Finger verschlossen. Der Versuch läßt sich so nur zu zweit durchführen.

Man vergleicht nun den Ton, den man direkt von der Stimmgabel wahrnimmt, mit dem Ton, den man durch das Quincke-Rohr hört. Im ersten Fall hört man den Grundton, im zweiten Obertöne.⁸⁾

Man kann auch den beweglichen Teil des Rohres verschieben und hört dann durch das Quincke-Rohr wieder deutlich den Grundton.

13. Stunde

Die Stunde beginnt mit der Besprechung der Hausaufgabe (A 3.1 und/oder A 3.2). Dabei wird vor allem das Prinzip klargestellt: Die Überlegungen betreffen jeweils die Schwingung an einem festen Ort. Man betrachtet die von jeder der beiden Teilwellen verursachten Auslenkungen eines Schwingers zu einem Zeitpunkt und bildet graphisch die Summe dieser Auslenkungen. Wird die Addition (für den bestimmten Ort) für weitere Zeitpunkte durchgeführt, so erhält man schließlich das $s_y(t)$ -Diagramm für den betrachteten Schwinger.

Anschließend wird mit der Wellenwanne die Interferenz zweier Kreiswellensysteme gezeigt. Dazu läßt man beide Erreger gleichphasig schwingen. Gegenüber dem Versuch mit dem Quincke-Rohr gibt es hier unterschiedliche Beobachtungsmöglichkeiten: Einerseits betrachtet man die räumliche Struktur des gesamten Wellenbildes, andererseits die Bewegung einzelner Wasserteilchen (nur hier liegt die Analogie zur Beobachtung am Quincke-Rohr).

Man kann besonders gut beobachten, wenn man - je nach Typ der Wellenwanne - außer an die Decke oder auf die Mattglasscheibe auch recht flach über die Wasseroberfläche blickt. Die Linien maximaler Verstärkung und maximaler Schwächung (Auslöschung) sollten dann gut zu erkennen sein.

Für die folgende Analyse eignet sich das Interferenzmodell nach Pohl gut (zwei verschiebbare Folien mit fett gezeichneten konzentrischen Kreisen; vom Lehrmittelhandel zu beziehen oder aus dem Physikbuch von Kuhn, Westermann-Verlag, bzw. die Kopiervorlage auf S. 55 verwenden). Mit Hilfe des Schreibprojektors werden Kreiswellen-

⁸⁾ Wir hatten den Eindruck, daß man durch das Rohr nicht die erste Oktave ($f = 880 \text{ Hz}$), sondern die zweite Oktave ($f = 1760 \text{ Hz}$) wahrnimmt.

systeme dargestellt. Zunächst wird die Analogie mit dem Gesamteindruck der Erscheinungen in der Wellenwanne herausgestellt.

Um nun an diesem Modell das Zustandekommen einer Linie zu verstehen, betrachtet man zunächst einen Punkt dieser Linie und erklärt z. B. bei Auslöschung sein Entstehen durch das Aufeinandertreffen von Wellenberg und Wellental (im Modell: helle Linie einer Kreiswelle auf dunkler Linie der anderen Kreiswelle). Das Pohl-Modell stellt nur eine Momentaufnahme (auch) des betrachteten Punktes dar. Daher muß geklärt werden, warum an diesem Punkt jederzeit Auslöschung auftritt. Dazu erinnert man sich an die eingangs besprochene Hausaufgabe, in der das $s_y(t)$ -Diagramm eines Schwingers maximale Schwächung (bei gleichen Amplituden der Teilschwingungen: Auslöschung) über die gesamte Zeit zeigt (vgl. A 3.2 d).

Nun sollen die geometrischen Bedingungen für den zuvor betrachteten Punkt (und andere Punkte) gefunden werden, bei dem ständig Auslöschung auftritt. Zwei Folien mit je einem gezeichneten Kreiswellensystem werden projiziert (vgl. Kopiervorlage auf S. 56; Linienabstände wesentlich größer als beim Pohl-Modell). Man kann nun auf einer zum Schutz über die ersten Folien gelegten weiteren Folie zeichnen. Die Schülerinnen und Schüler erhalten eine Kopie, die beide Systeme überlagert zeigt. Im Pohl-Modell kann man zwar die Interferenzlinien gut erkennen, aber man kann dort nicht zeichnen. Hier ist es umgekehrt, und das ist jetzt von Vorteil.

Zunächst können die Schülerinnen und Schüler auch hier Linien maximaler Verstärkung und Auslöschungslinien einzeichnen. (Man muß natürlich nicht gleich alle Linien einzeichnen lassen.)

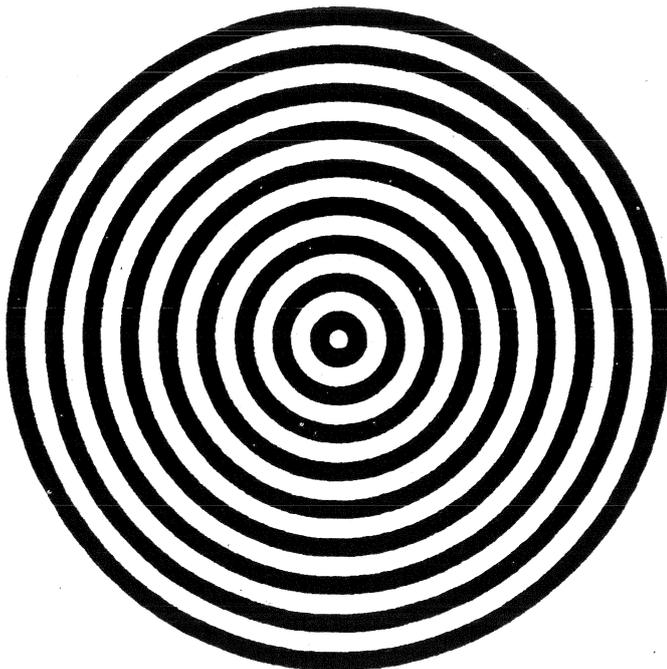
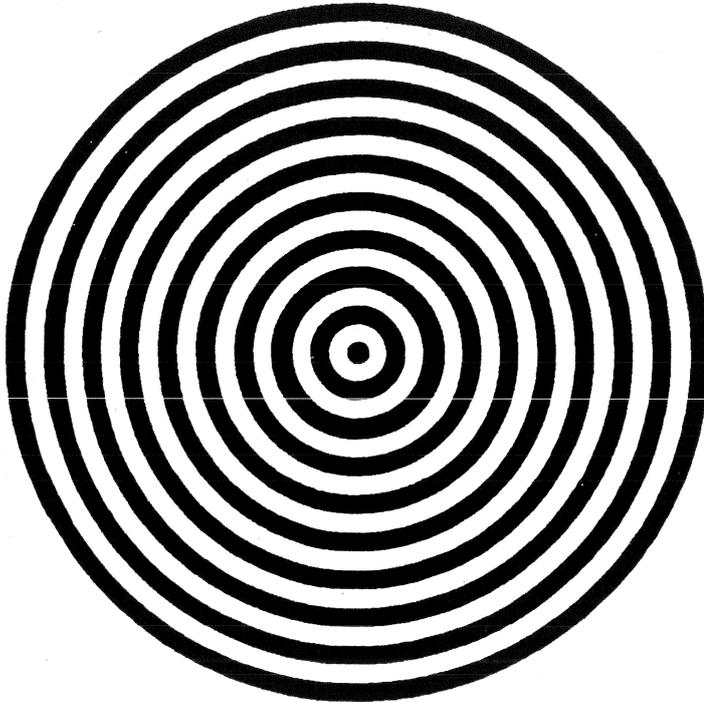
Nun zeichnet man Wellenstrahlen ein, die von den beiden Erregern zu einem Punkt einer betrachteten Linie führen, mißt deren Längen s_1 und s_2 und bildet deren Längendifferenz Δs . Hier taucht zum ersten Mal bei einer zweidimensionalen Welle der Begriff des Gangunterschiedes (für einen betrachteten Punkt) auf. Die Schülerinnen und Schüler zeichnen selbst in ihre Kopien ein und stellen so fest, daß der Gangunterschied Δs für verschiedene Punkte einer Linie konstant ist. Dieselben Überlegungen werden für andere Linien durchgeführt.

Folgende Aussagen werden gefunden:

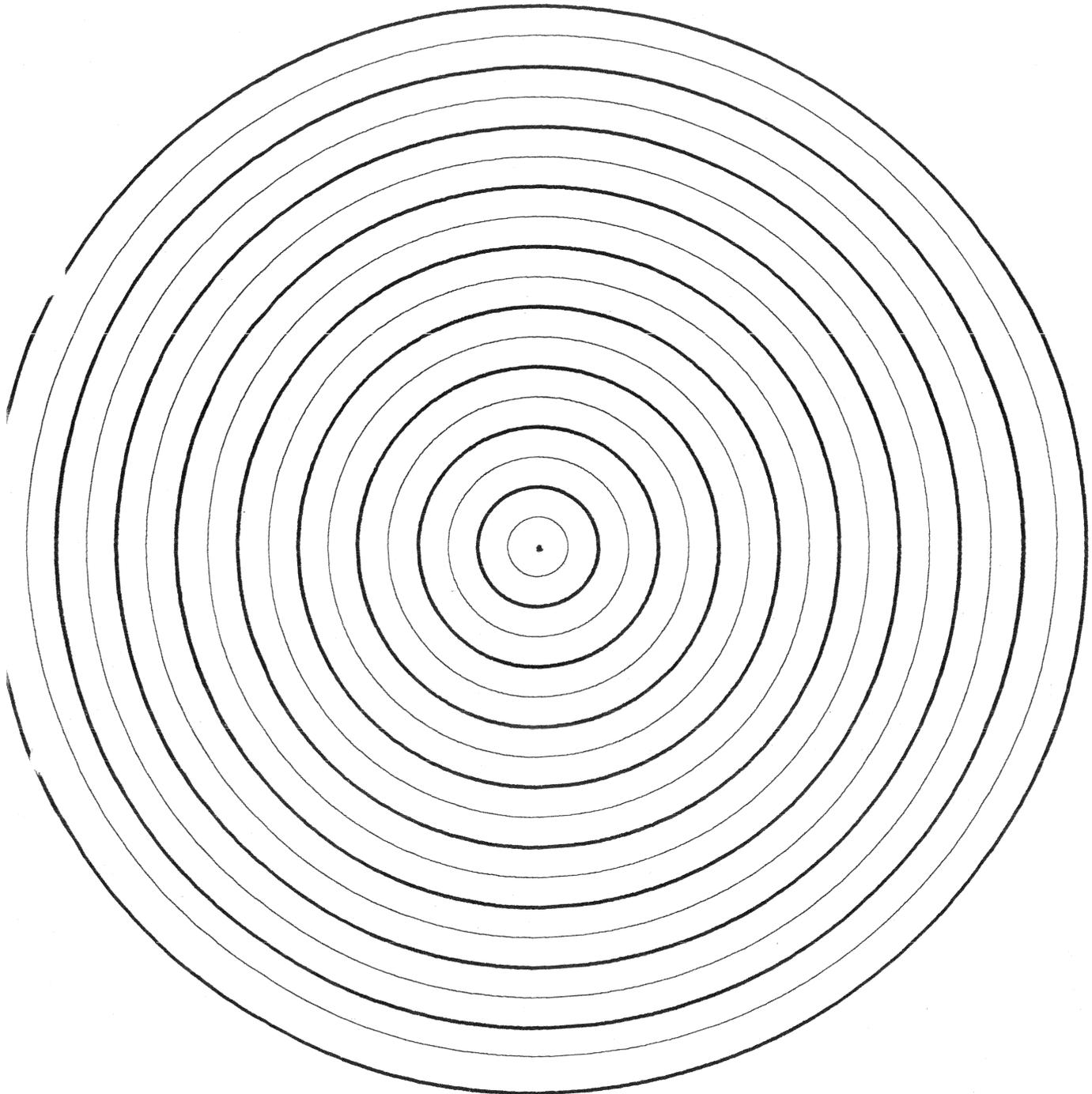
- Für die erste Linie maximaler Verstärkung (Symmetrieachse des Wellenbildes) gilt: $\Delta s = 0$.
- Für die erste Auslöschungslinie neben der Symmetrieachse gilt: $\Delta s = \frac{1}{2} \cdot \lambda$.
- Von einer Auslöschungslinie zu einer benachbarten Auslöschungslinie ändert sich der Gangunterschied um λ .

Hausaufgabe: A 3.3

Kopiervorlagen für das Pohlische Modell
(Für das Pohlische Modell mit zwei phasengleich schwingenden Erregern muß eine der beiden Kopiervorlagen zweimal auf Folie kopiert werden.)



Kopiervorlage für Kreiswellensysteme



Bemerkungen:

- Die Beschreibung einer Linie als Menge von Punkten, die von den beiden Erregern eine konstante Abstandsdifferenz haben, stellt die geometrische Definition der Hyperbel dar.
- Streng genommen sieht man in der Wellenwanne nicht einzelne scharf begrenzte Linien allein, sondern mehr oder weniger breite „Täler“ und „Berge“, für deren Punkte Δs nur ungefähr $z \cdot \lambda$ bzw. $(z - \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ beträgt. Hier zeigt sich eine Grenze des Pohlischen Interferenzmodells, das nur die zwei Zustände „dunkel“ und „hell“ zeigt und daher nicht zur Klärung von Fragen taugt, die Punkte mit nicht maximaler Amplitude betreffen. Dennoch hat das Pohlische Modell seine Berechtigung an dieser Stelle im Unterricht, weil es als Abbild des Wellenwannenbildes die Interferenzlinien zeigt und so die Verbindung zu den Folien herstellt, die bei den Betrachtungen der Gangunterschiede benutzt werden.
- Die Zahl der Interferenzhyperbeln hängt vom Abstand der beiden Erreger ab. Wenn bei der verwendeten Wellenwanne der Erregerabstand variabel ist, kann man das im Experiment prüfen. Mit dem Pohlischen Modell läßt sich diese Aussage gut bestätigen.
- Eine Frage nach einer Veränderung des Interferenzbildes bei gegenphasig schwingenden Erregern könnte in einer Klausur gestellt werden.

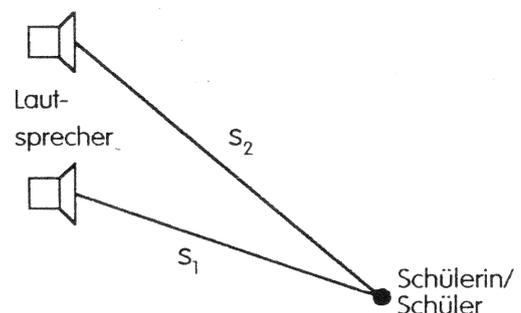
14. Stunde

Die in den beiden vorangegangenen Stunden erarbeiteten Einsichten über das Interferenzverhalten von Wellen werden bei der Untersuchung von Schall- und Ultraschallwellen erweitert und vertieft.

Die Interferenz von Schallwellen wird demonstriert (vgl. D 3.2). Bei der Versuchsbesprechung sollen sich die Schülerinnen und Schüler unter anderem auf die Versuche mit dem Quincke-Rohr und der Wellenwanne zurückbesinnen. Wo sind Gemeinsamkeiten (Überlagerung, Gangunterschied), wo sind Unterschiede (Dimension, Medium, Art der Wellen)?

Falls durch störende Reflexionen der Schallwellen im Raum keine genaue Lokalisierung der Maxima und Minima möglich ist, sollte trotzdem das Meßprinzip besprochen werden.

Der Gangunterschied läßt sich hier mit einem Maßband direkt messen.



Beispiel:

Man lokalisiert das Minimum 3. Ordnung bei einer Frequenz von 4 kHz. Die Abstandsdifferenz Δs zu den beiden Lautsprechern ist dann so groß (21 cm), daß die Ungenauigkeiten der Längenmessungen von s_1 und s_2 zu einem kleinen relativen Fehler bei der Bestimmung von Δs führen.

Verwendet man jetzt statt der Schallwellen im hörbaren Bereich Ultraschallwellen, so treten Störungen durch Reflexion nicht auf (vgl. D 3.3). Außerdem hat man hier den Vorteil, daß man viele Teiluntersuchungen (zunächst nur qualitativ, vgl. D 3.3) durchführen kann, um das Phänomen der Interferenz von Wellen zu klären.

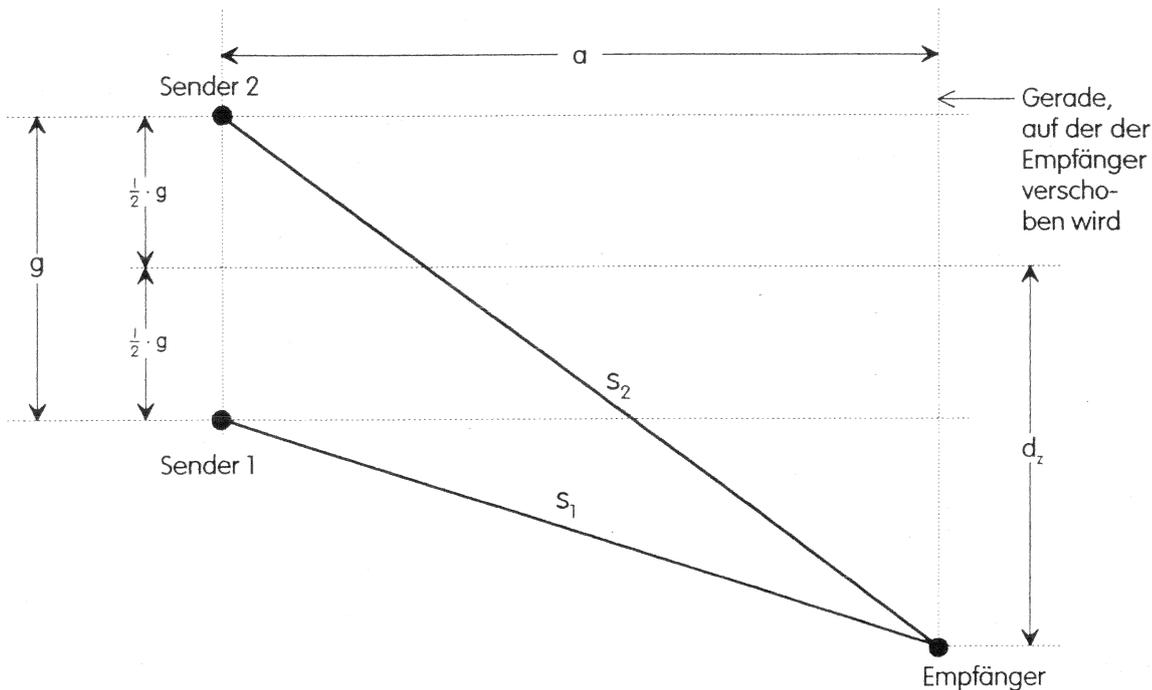
15. Stunde:

In dieser Stunde soll ein Interferenzversuch mit Ultraschallwellen quantitativ ausgewertet werden (vgl. D 3.4). Die Bestimmung des Gangunterschiedes ist hier aufwendiger als die Maßbandmethode bei Schallwellen mit größerer Wellenlänge. Der Grund für diese Verfahrensänderung wird diskutiert: Wegen der kleinen Wellenlänge bei Ultraschall führen die Ungenauigkeiten der Längenmessungen von s_1 und s_2 zu einem großen relativen Fehler bei der Bestimmung von Δs .

Es muß ein Meßverfahren entwickelt werden, bei dem der Gangunterschied aus gut zugänglichen Meßgrößen errechnet werden kann.

Gemessen werden (vgl. Abbildung)

- der Abstand g zwischen den beiden Sendern,
- der Abstand a zwischen den Sendern und der Verschiebungsgeraden des Empfängers,
- der Abstand d_z zwischen dem Maximum nullter Ordnung und dem betrachteten Extremum auf der Verschiebungsgeraden des Empfängers.



Die Schülerinnen und Schüler leiten den Zusammenhang zwischen den gesuchten Abständen s_1 und s_2 und den drei genannten Meßgrößen her. Mit dem Satz des Pythagoras gilt:

$$s_2 = \sqrt{a^2 + (d_z + \frac{1}{2} \cdot g)^2} \quad ; \quad s_1 = \sqrt{a^2 + (d_z - \frac{1}{2} \cdot g)^2}$$

Aus der Ordnungszahl z und dem Gangunterschied ergibt sich die Wellenlänge λ ; bei bekannter Frequenz f läßt sich dann die Schallgeschwindigkeit c berechnen.

16. Stunde:

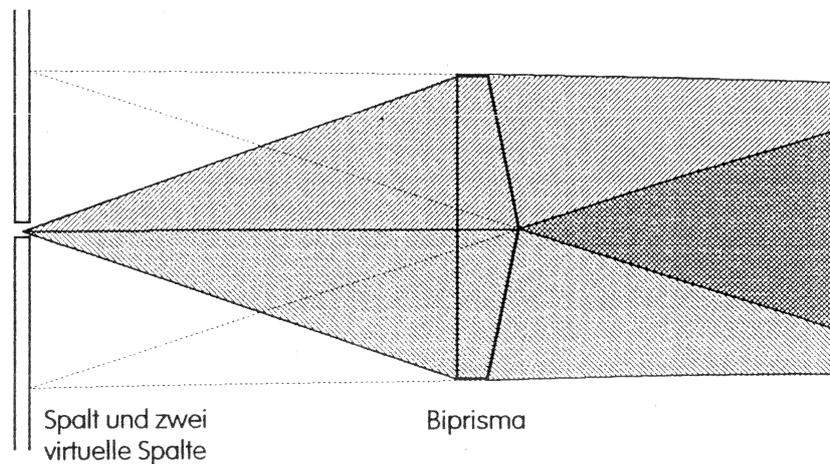
Es soll hier ein Interferenzversuch mit Licht durchgeführt werden, der mit den bisher behandelten Versuchen zur Zweistrahlinterferenz vergleichbar ist. Das Phänomen der Beugung soll noch nicht untersucht werden. Es bieten sich die Versuche mit dem Biprisma und mit dem Doppelspiegel an; der Biprisma-Versuch ist leichter zu justieren und wohl auch leichter zu verstehen.

Es ist in diesem Unterrichtsgang der erste Versuch, bei dem Welleneigenschaften des Lichtes beobachtet werden, auch wenn vorher schon häufiger von Lichtwellen gesprochen wurde. Für die Durchführung und Auswertung werden zwei Stunden benötigt.

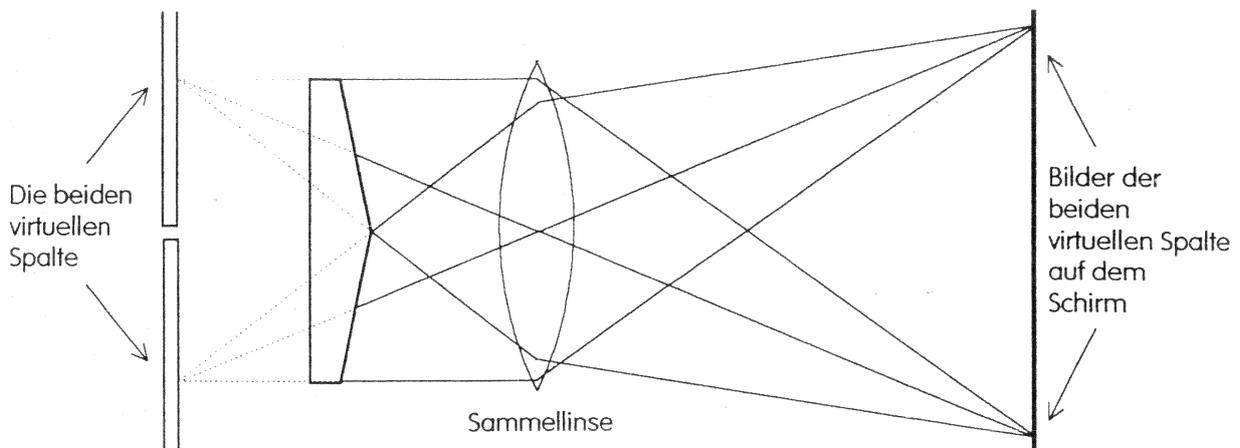
Aufgrund der bisher behandelten Versuche zur Zweistrahlinterferenz ist klar, daß zwei „Lichtsender“ benötigt werden. Wegen der kleinen Wellenlänge des Lichtes müssen diese „Sender“ sehr dicht nebeneinanderstehen.

Durch das Biprisma entstehen dicht nebeneinander zwei virtuelle Spalte.

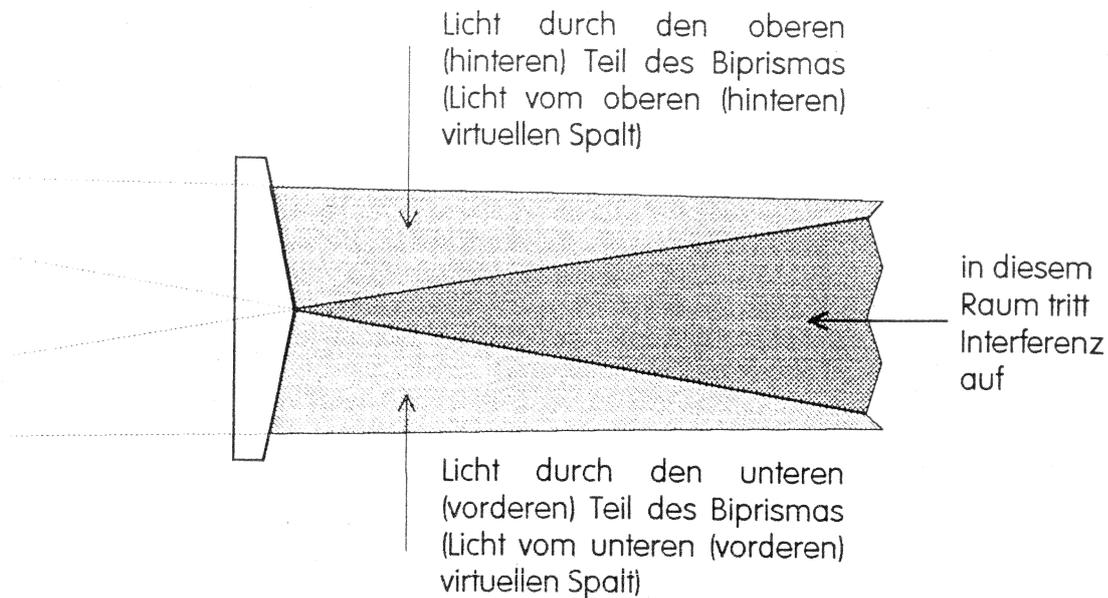
Diese Aussage muß durch eine Tafelzeichnung verständlich gemacht werden.



Eine Abbildung mit Hilfe einer Sammellinse zeigt diese beiden virtuellen Spalte:



Nach Entfernen der Sammellinse entstehen auf dem Schirm Interferenzstreifen (vgl. D 3.5).



Die Schülerinnen und Schüler sollten in dieser Stunde die Interferenzerscheinung beobachten. Aufgabe ist es jetzt, die Wellenlänge des (sichtbaren) Lichtes abzuschätzen. Ohne Rechnung sollten hier zunächst folgende Fragen diskutiert werden:

„Welche Größen sollen gemessen werden?“ und

„Auf welchem Wege läßt sich dann die Wellenlänge berechnen?“

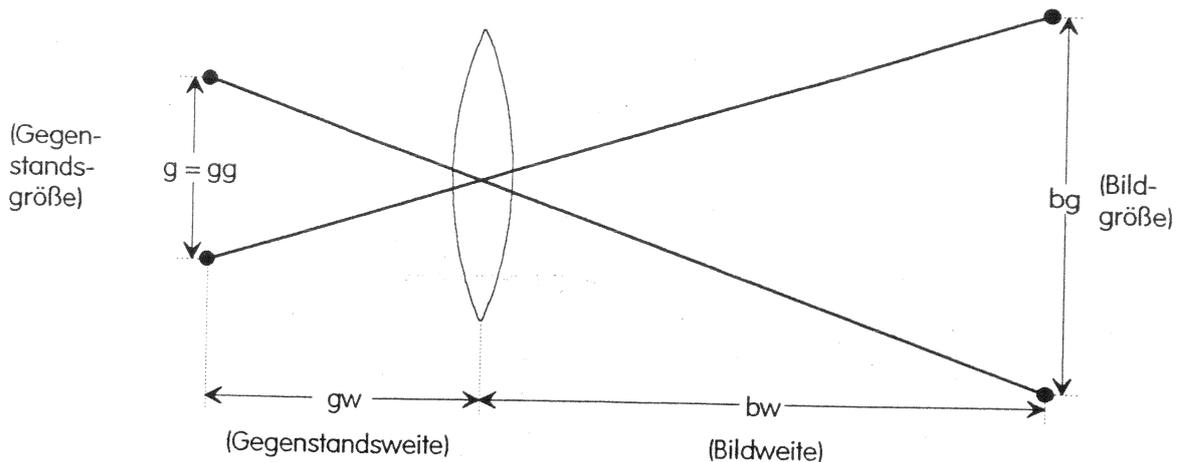
Bemerkung:

Es ist nicht erforderlich, eine bestimmte Wellenlänge zu messen. Würde man bei Glühlicht (Einschieben eines Farbfilters) nur eine bestimmte Lichtsorte untersuchen, so wäre das Interferenzbild sehr lichtschwach. Man sollte sich hier mit einer Abschätzung der Lichtwellenlänge begnügen. Der Schwerpunkt liegt hier darauf, daß die Schülerinnen und Schüler den Versuch prinzipiell verstehen. Es ist hier eine zusätzliche Aufgabe, die Farberscheinungen im Interferenzbild zu erklären. Genauere Wellenlängenmessungen werden später bei Versuchen mit dem optischen Gitter durchgeführt. Verwendet man beim Biprisma-Versuch allerdings Laserlicht, dann wird hier natürlich die Wellenlänge dieses Lichtes gemessen.

17. Stunde:

Die Wellenlänge von sichtbarem Licht soll jetzt abgeschätzt werden. Der Abstand der beiden virtuellen Spalte wird nach der Abbildungsgleichung bestimmt:

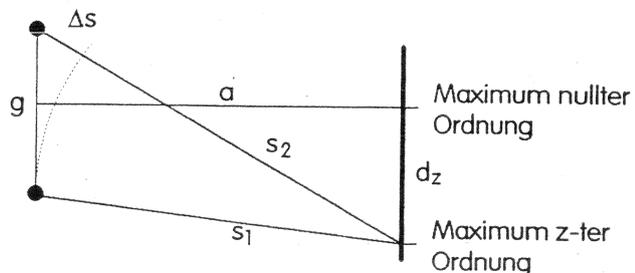
$$g = gg = \frac{bg \cdot gw}{bw}$$



Zur Berechnung der Wellenlänge wird man zunächst die Überlegungen anwenden, die bei den bisherigen Versuchen zur Zweistrahlinterferenz erfolgreich waren.

Man berechnet aus g , a und d_z die beiden Wege s_2 und s_1 , bildet deren Differenz und erhält so den Gangunterschied Δs bzw. ein bestimmtes Vielfaches der Wellenlänge.

Man wird hier feststellen, daß s_2 und s_1 im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich a sind, ihre Differenz ist dann gleich 0 mm.



Bemerkung:

Die meisten Taschenrechner arbeiten mit einer so großen Genauigkeit, daß die oben angedeutete Rechnung zum richtigen Ergebnis führt. Es ist aber den Schülern schwer klarzumachen, daß diese Genauigkeit hier für die Bestimmung der Differenz erlaubt ist, während sonst bei Auswertungen in der Physik sinnvoll gerundet werden soll.

Die Rechnung hatte gezeigt, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit gilt: $s_1 + s_2 = 2 \cdot a$.

$$\text{Mit } s_2^2 - s_1^2 = (a^2 + (d_z + \frac{g}{2})^2) - (a^2 + (d_z - \frac{g}{2})^2)$$

und dem dritten binomischen Satz gilt:

$$2 \cdot a \cdot (s_2 - s_1) = 2 \cdot 2 \cdot d_z \cdot \frac{g}{2}, \text{ also } \Delta s = \frac{d_z \cdot g}{a}$$

Meßbeispiel:

$$g_w = 0,20 \text{ m}; \quad b_w = 3,80 \text{ m}; \quad b_g = 0,007 \text{ m}; \quad a = 4,00 \text{ m}; \quad d_z = 0,013 \text{ m}.$$

Daraus ergibt sich:

$$g = \frac{b_g \cdot g_w}{b_w} = \frac{0,007 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m}}{3,8 \text{ m}} = 0,37 \text{ mm}$$

$$\Delta s = \frac{d_z \cdot g}{a} = \frac{0,013 \text{ m} \cdot 0,00037 \text{ m}}{4,00 \text{ m}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1200 \text{ nm}$$

$$\lambda = 600 \text{ nm}$$

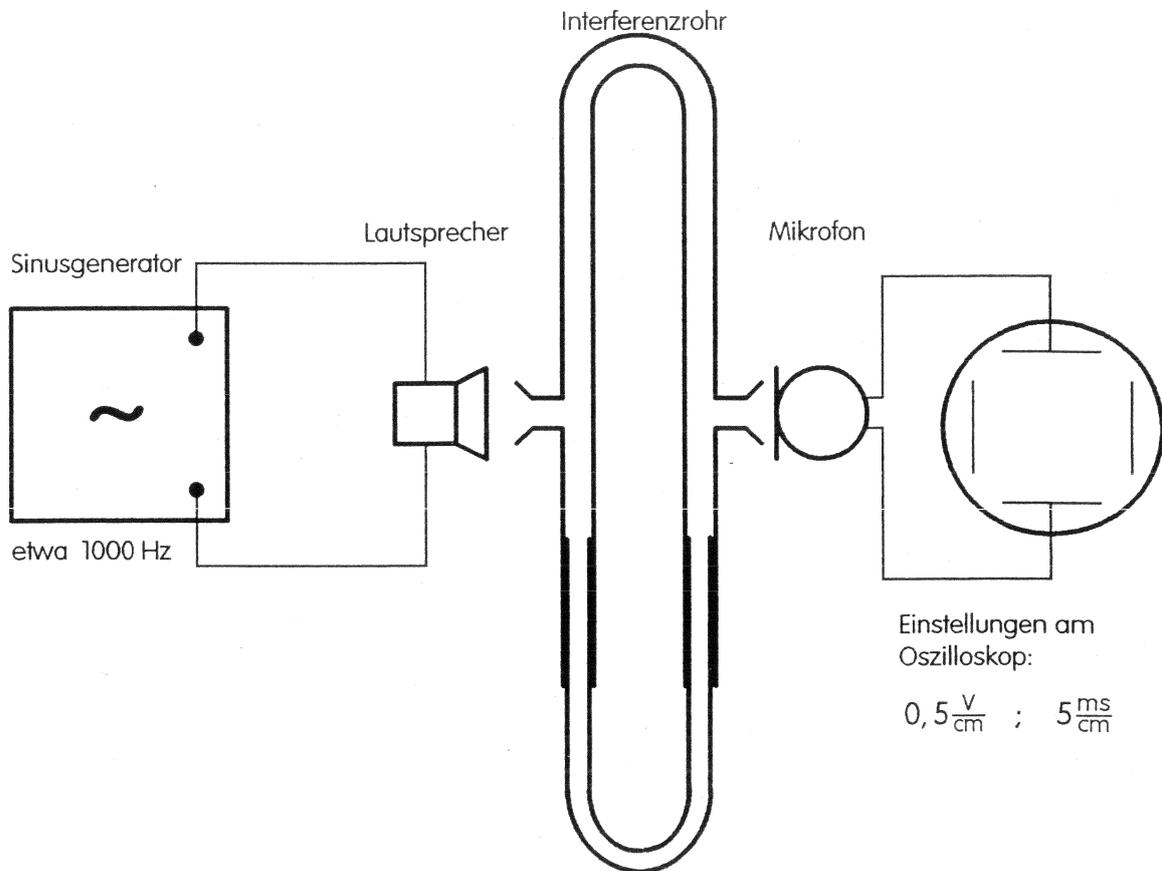
Es wird mitgeteilt, daß die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes etwa in dem Bereich zwischen 400 nm (violett) und 800 nm (rot) liegen. Daß die Wellenlänge des roten Lichtes größer ist als die des blauen, zeigt das Interferenzbild mit Glühlicht.

Bemerkungen:

- Eventuell kann im Lehrervortrag über das Entstehen von Licht in der Lichtquelle und über die notwendige Kohärenz der Lichtwellen bei der Interferenz gesprochen werden.
- Hier wird zum ersten Mal eine Welleneigenschaft bei Licht beobachtet. Es ist wichtig, gleich am Anfang darauf hinzuweisen, daß das Wellenmodell nur ein Modell ist, mit dem bestimmte Beobachtungen bei Experimenten mit Licht beschrieben und erklärt werden können. Licht ist keine Welle.

3.4 Demonstrationsversuche

D 3.1 Interferenzrohr



Es ist zu empfehlen, den festen Teil des Interferenzrohres mit Tischklemmen zu befestigen. Etwas Öl ermöglicht ein leichteres Verschieben des beweglichen Teils.

Bei etwa 1000 Hz sind Amplitudenschwankungen mit dem Oszilloskop deutlich nachzuweisen. Man beginnt mit nicht ausgezogenem Rohr. Das nächste Maximum erhält man, wenn man den einen Schall-Weg um etwa $2 \cdot 17 \text{ cm}$ verlängert. Bei höheren Frequenzen werden Schallwellen auch außerhalb des Rohres übertragen, so daß am Oszilloskop keine deutlichen Änderungen festzustellen sind.

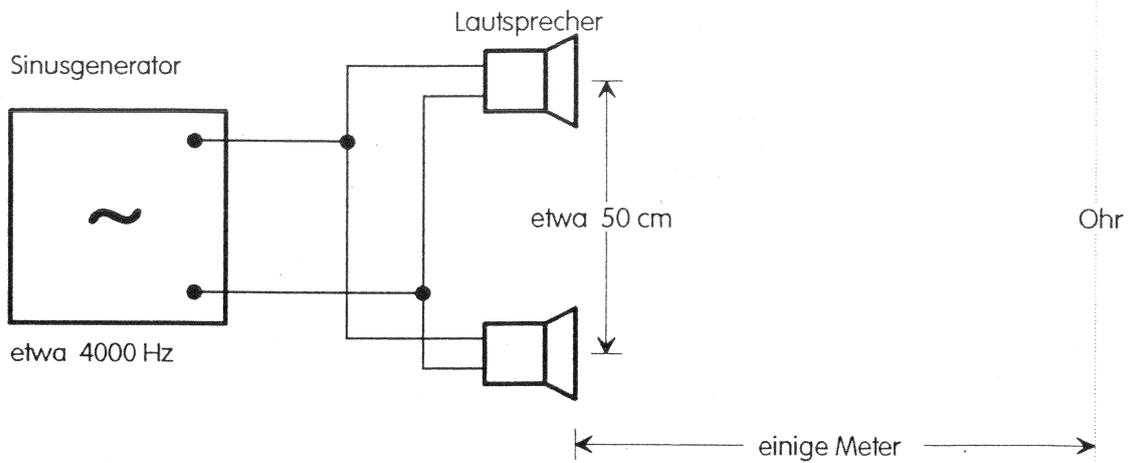
Mit dem Ohr lassen sich Lautstärkeschwankungen am Ausgang des Interferenzrohres bei einer Frequenz von etwa 4 kHz gut feststellen. Ein Schlauch zwischen Ausgang des Rohres und dem Ohr kann die Untersuchung erleichtern.

Beschaffungshinweise:

Phywe: „Interferenzrohr nach Quincke“ - 03482.00

Leybold: „Interferenzröhre“ - 41505 (einschließlich Hörschlauch 1 m)

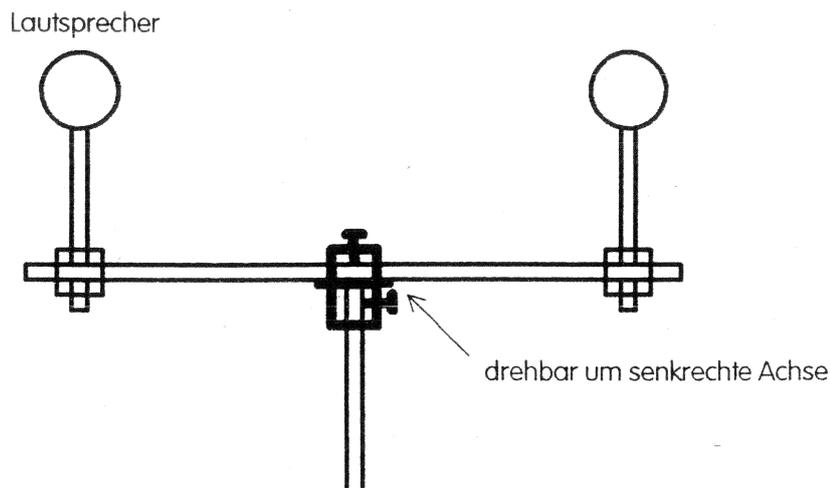
D 3.2 Interferenz von Schallwellen



Die beiden Lautsprecher werden parallel an den Sinusgenerator angeschlossen, so daß ihre Membranen gleichphasig schwingen. Als Frequenz wird etwa ein Wert von 4 kHz gewählt. Bewegt man sich langsam parallel zu den Lautsprechern in etwa 5 m Abstand, so hört man Lautstärkemaxima und -minima. Die Untersuchungen werden durch die Schallreflexionen an den Wänden des Klassenraumes gestört.

Etwas leichter ist der Versuch folgendermaßen durchzuführen:

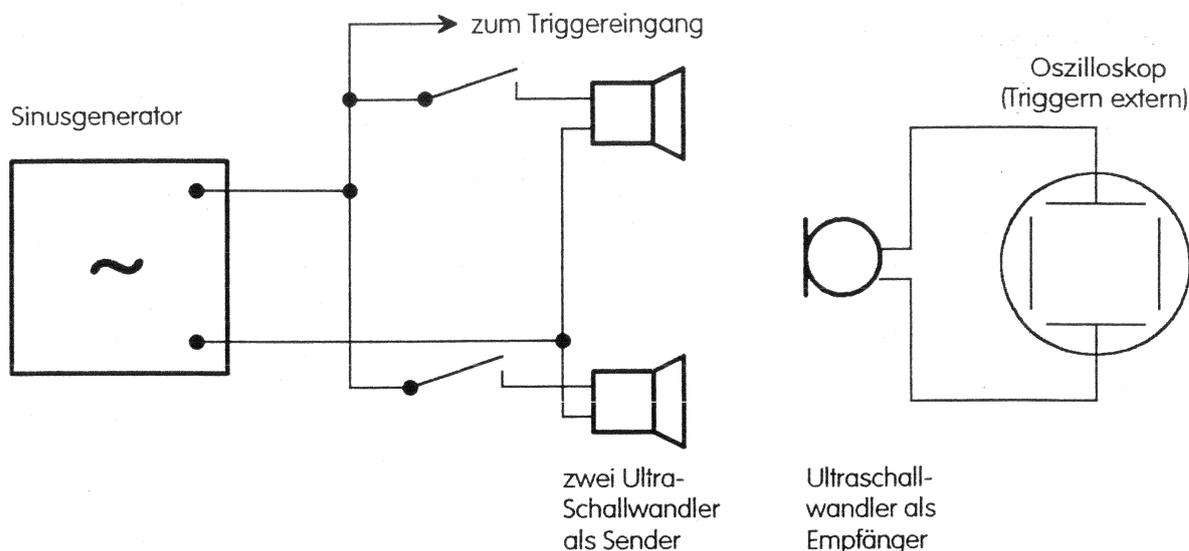
Die Lautsprecher werden auf einer Stativstange befestigt, die um ihre Mitte um eine senkrechte Achse drehbar ist (Drehmuffe). Verdreht man die Stativstange mit den Lautsprechern langsam, so können die Schülerinnen und Schüler von ihrem Platz aus die Maxima und Minima wahrnehmen.



Der Versuch ist wegen der störenden Reflexionen kaum für eine quantitative Auswertung geeignet.

D 3.3 Interferenz von Ultraschallwellen

Zunächst lassen sich mit Ultraschallwellen gut qualitative Versuche durchführen. Die Frequenz ist von den Ultraschallwandlern vorgegeben. Sie muß so eingestellt werden, daß optimale Schwingungen entstehen (Kontrolle mit Empfänger und Oszilloskop). Die beiden Sender sollten so ausgewählt werden, daß die von ihnen abgestrahlten Schallwellen etwa gleiche Amplitude haben.



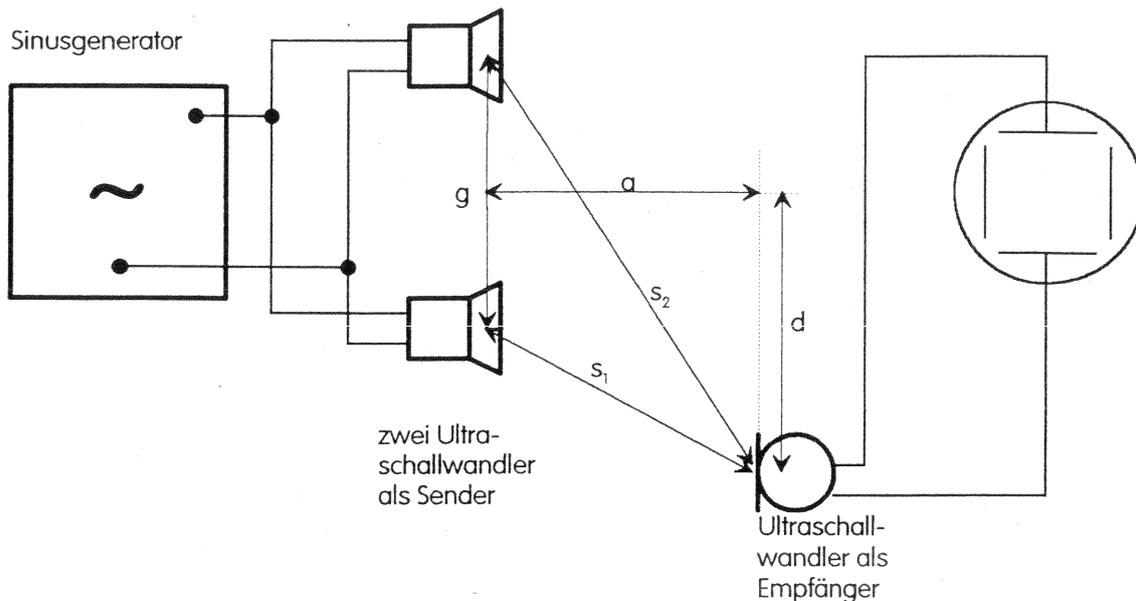
Bei der angegebenen Schaltung lassen sich zunächst verschiedene qualitative Untersuchungen durchführen:

- Bei geschlossenen Schaltern werden Sender und Empfänger so justiert, daß ein Überlagerungsmaximum registriert wird. Bei unterschiedlicher Stellung der beiden Schalter kann man am Ort des Empfängers die Einzelschwingungen nachweisen, die durch die einzelnen Sender erzeugt werden. Sie sind gleichphasig und haben etwa die gleiche Amplitude. Wenn beide Sender eingeschaltet sind, registriert man die Schwingung, die durch Überlagerung der beiden Teilwellen entsteht. Sie hat etwa die doppelte Amplitude.
- Bei geschlossenen Schaltern werden Sender und Empfänger so justiert, daß ein Überlagerungsminimum (Auslöschung) registriert wird. Die Schwingung, die durch die Überlagerung beider Teilwellen entsteht, hat jetzt etwa die Amplitude null. Sieht man sich aber die Einzelschwingungen an, so stellt man fest, daß beide Schwingungen unveränderte Amplituden haben. Bei externer Triggerrung des Oszilloskops (siehe Schaltplan) sieht man, daß die beiden Einzelschwingungen jetzt um eine halbe Schwingungsdauer verschoben sind. Sie sind gegenphasig.
- Für beliebige Einstellungen zwischen den beiden Extremfällen lassen sich die beiden Teilschwingungen beobachten. Man kann Vermutungen darüber anstellen, welche Amplitude die Welle hat, die durch Überlagerung entsteht. Beim Schließen beider Schalter sieht man das experimentelle Ergebnis.

D 3.4 Messung der Wellenlänge bei Ultraschallwellen

Mit Ultraschallwellen lassen sich gut quantitative Versuche durchführen. Die Frequenz ist von den Ultraschallwandlern vorgegeben. Sie muß so eingestellt werden, daß optimale Schwingungen entstehen (Kontrolle mit Empfänger und Oszilloskop). Die beiden Sender sollten so ausgewählt werden, daß die von ihnen abgestrahlten Schallwellen etwa gleiche Amplitude haben.

Der Linsenfuß, auf dem der Empfänger montiert ist, kann bequem senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwellen auf einem Lineal verschoben werden.



Meßbeispiel:

Frequenz: $f = 36\,500\text{ Hz}$, Abstand der Sender: $g = 7,5\text{ cm}$,
 senkrechter Abstand zum Empfänger: $a = 40\text{ cm}$,
 Abstand zwischen Hauptmaxima nullter und zweiter Ordnung: $d_2 = 10,5\text{ cm}$.

Auswertung:

$$s_2 = \sqrt{a^2 + \left(d_2 + \frac{1}{2} \cdot g\right)^2}$$

$$s_2 = \sqrt{(40\text{ cm})^2 + (10,5\text{ cm} + 3,75\text{ cm})^2} = 42,5\text{ cm}$$

$$s_1 = \sqrt{a^2 + \left(d_2 - \frac{1}{2} \cdot g\right)^2}$$

$$s_1 = \sqrt{(40\text{ cm})^2 + (10,5\text{ cm} - 3,75\text{ cm})^2} = 40,6\text{ cm}$$

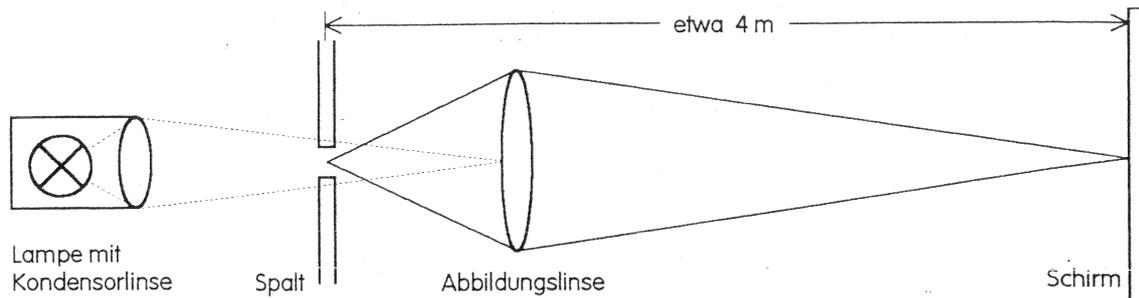
$$\Delta s = 1,9\text{ cm}; \lambda = 9,5\text{ mm}.$$

$$\text{Mit } f = 36\,500\text{ Hz ergibt sich: } c = 346 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

D 3.5 Interferenz beim Biprisma

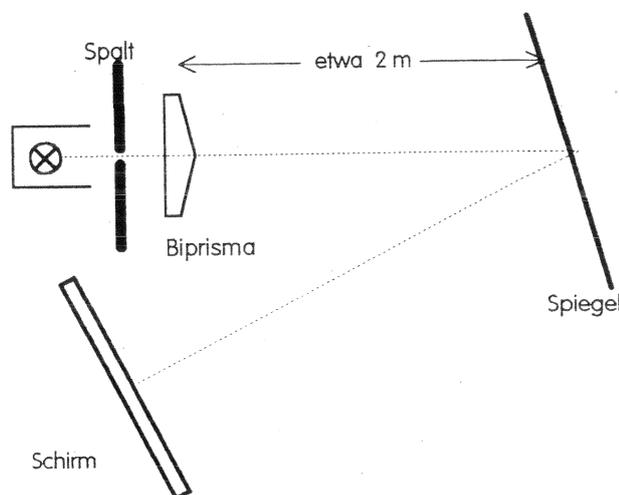
Tips zum Justieren:

- Lampenwendel (bei langer Wendel) senkrecht stellen.
- Abstand Glühbirne - Kondensorlinse so wählen, daß die Lampenwendel etwa dort abgebildet wird, wo die Abbildungslinse später steht (etwa 20 cm Abstand).
- Spalt dicht vor die Kondensorlinse stellen. Der Spalt soll gut ausgeleuchtet sein und senkrecht stehen.
- Spalt mit Abbildungslinse ($f = 20 \text{ cm}$) auf einem etwa 4 m entfernten Schirm abbilden. Ausleuchtung des Spaltes am Bild kontrollieren und gegebenenfalls verbessern.

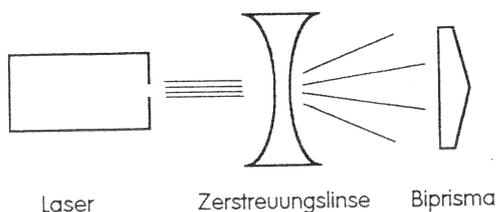


- Biprisma zwischen Spalt und Sammellinse schieben. Auf dem Schirm müssen zwei Spaltbilder entstehen. Die Spaltbilder sollen gleich hell sein und senkrecht stehen.
- Sammellinse entfernen. Auf dem Schirm sollte die Interferenzfigur aus äquidistanten Streifen entstehen.

- g) Das Interferenzbild auf dem Schirm läßt sich jetzt nur noch durch Verstellen des Spaltes (Spaltbreite und Spaltichtung) verbessern: Der Spalt darf nicht zu breit sein, er muß parallel zur Grenzlinie zwischen den beiden Prismen stehen! Am besten verwendet man einen Spalt, bei dem beide Einstellungen an einer einzigen Stellschraube vorgenommen werden können.



Zusätzlicher Tip für die Feineinstellung: Spiegel in halber Entfernung zum Schirm, Schirm vorübergehend neben die Lampe stellen.



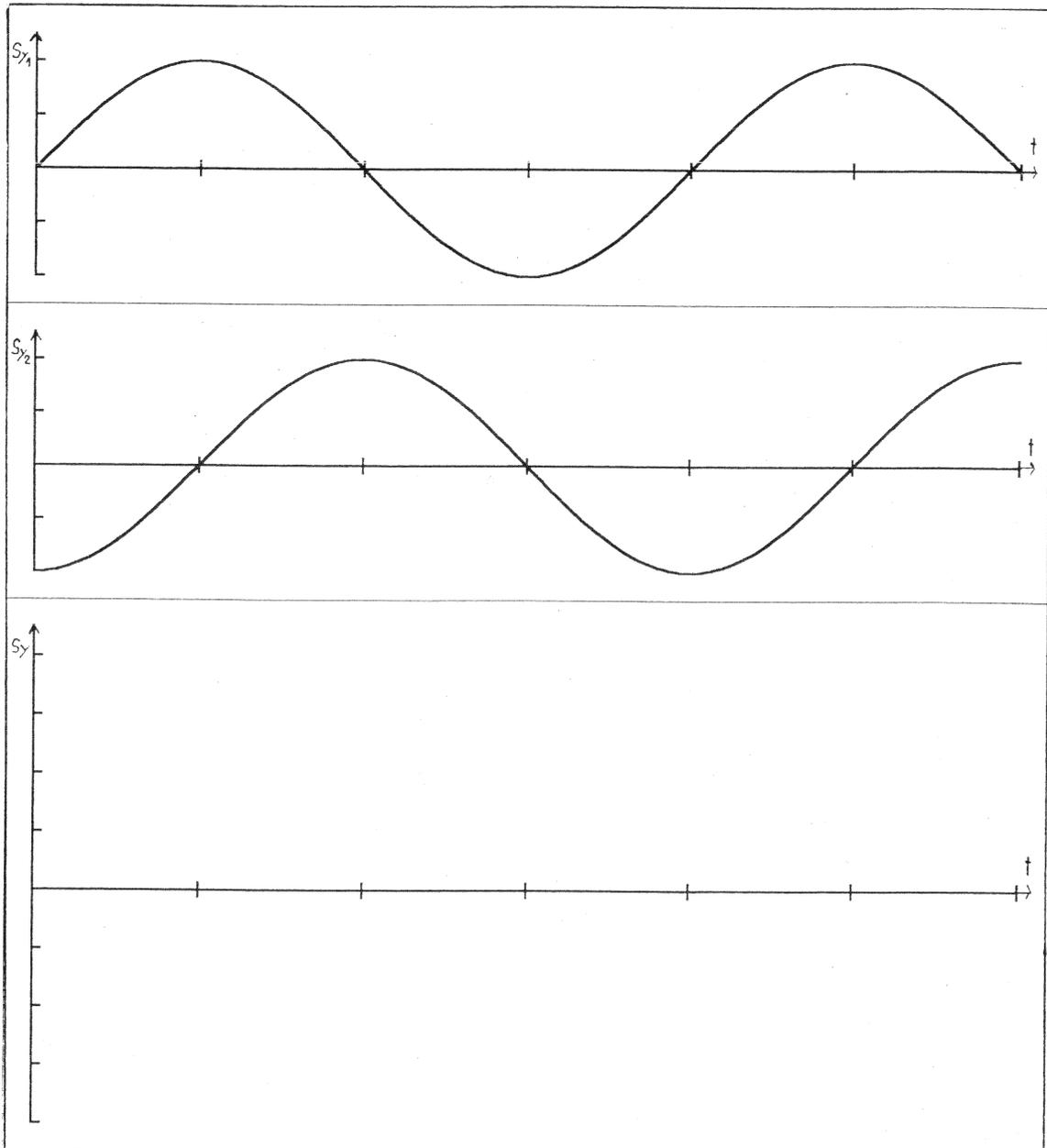
Der Versuch läßt sich auch mit Laserlicht durchführen. Der Laserstrahl muß hierbei aufgeweitet werden (z.B. mit einer Zerstreuungslinse $f = -10 \text{ cm}$); sonst sind auf dem Schirm nur zwei Punkte, aber keine Interferenzfigur zu sehen.

3.5 Aufgabenbeispiele

A 3.1 Gegeben sind zwei Schwingungen, die sich aufgrund zweier Teilwellen an einem Ort ergeben würden. Die beiden Schwingungen haben die gleiche Amplitude und die gleiche Schwingungsdauer.

Die beiden Schwingungen bestehen nicht nebeneinander. Bei der Überlagerung der beiden Teilwellen entsteht an dem betrachteten Ort eine gemeinsame Schwingung. Zu jedem Zeitpunkt erhält man die Auslenkung s_y dieser Schwingung durch Addition der Auslenkungen s_{y1} und s_{y2} der beiden Teilschwingungen.

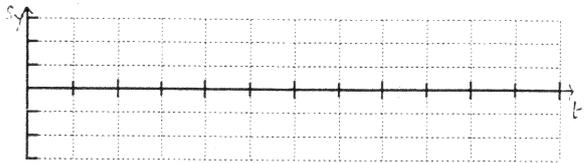
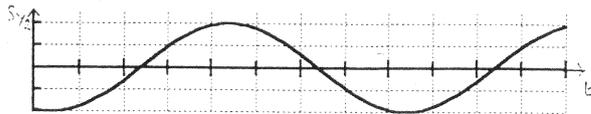
Zeichnen Sie das $s_y(t)$ -Diagramm, das sich durch Überlagerung der beiden Teilwellen am betrachteten Ort ergibt.



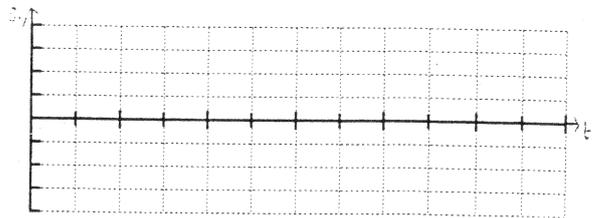
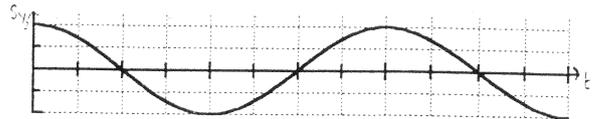
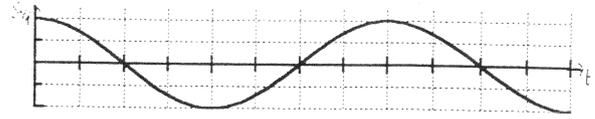
A 3.2 Gegeben sind zwei Schwingungen, die sich aufgrund zweier Teilwellen an einem Ort ergeben würden.

Zeichnen Sie das $s_y(t)$ -Diagramm, das sich durch Überlagerung der beiden Teilwellen am betrachteten Ort ergibt.

a)

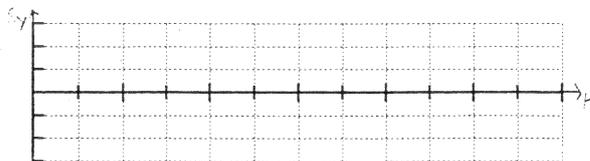
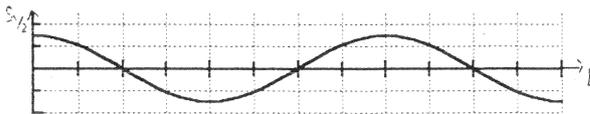


b)

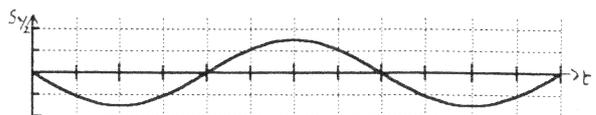


In den folgenden Beispielen sind die Amplituden der beiden Einzelschwingungen unterschiedlich:

c)



d)



A 3.3 Gegeben seien zwei Erreger, die gleichphasig schwingen. Sie erzeugen Wasserwellen. Der Abstand der Erreger betrage 3 cm, die Wellenlänge sei 1 cm.

a) Zeichnen Sie (im Maßstab 1:1) die beiden Erreger und (mit Hilfe eines Zirkels!) zehn verschiedene Punkte, für die der Gangunterschied 1 cm beträgt.

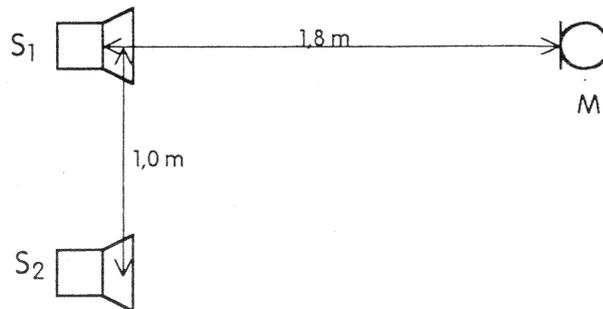
b) Zeichnen Sie Linien ein, auf denen alle die Punkte liegen, für die der Gangunterschied 1 cm beträgt.

A 3.4 Zwei Lautsprecher sind 50 cm voneinander entfernt. Ihre Membranen schwingen gleichphasig und senden Schallwellen der Wellenlänge 18 cm aus. Wie viele Lautstärke-Maxima und -Minima kann man höchstens feststellen, wenn man sich parallel zur Verbindungslinie der beiden Lautsprecher an ihnen vorbeibewegt?

A 3.5 Zur Bestimmung der Wellenlänge von Ultraschallwellen wird ein Interferenzversuch durchgeführt. Zwei als Sender benutzte Ultraschallwandler sind parallel an einen Sinusgenerator angeschlossen. Ihr Abstand beträgt 6 cm. Auf einer 30 cm entfernten Geraden (parallel zur Verbindungslinie der beiden Sender) werden mit Hilfe eines Empfängers Interferenzmaxima festgestellt. Der Abstand zwischen dem Maximum nullter und dem zweiter Ordnung beträgt 12 cm.

- Welche Wellenlänge ergibt sich?
- Mit welcher Frequenz schwingen die Lautsprechermembranen, wenn die Schallgeschwindigkeit $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt?

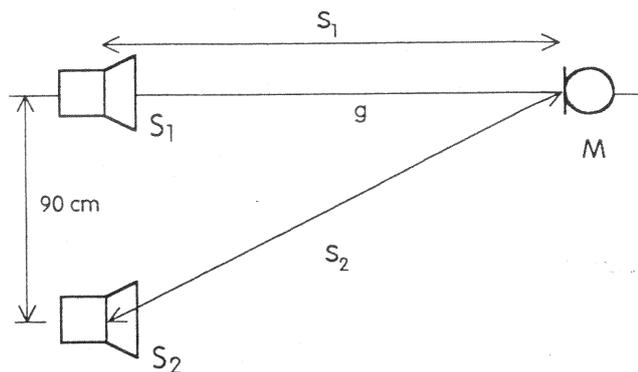
A 3.6 Zwei Schallstrahler S_1 und S_2 sind so an einen Tonfrequenzgenerator angeschlossen, daß sie stets mit gleicher Frequenz und in gleicher Phase schwingen. Der Abstand zwischen den beiden Schallstrahlern beträgt 1,00 m. Ein Mikrofon M ist 1,80 m von S_1 entfernt. Die Verbindungslinien S_2S_1 und S_1M bilden einen rechten Winkel (vgl. Skizze).



- Berechnen Sie den Gangunterschied der Schallstrahlen zum Mikrofon.
- Die Frequenz am Generator ist auf $f_0 = 3\,970$ Hz eingestellt, und zwar so, daß das Mikrofon ein Lautstärkemaximum registriert. Wie hängen Gangunterschied und Wellenlänge zusammen?
- Man weiß, daß die Wellenlänge bei diesem Versuchsaufbau 8 cm bis 9 cm beträgt. Welcher genaue Wert für die Wellenlänge λ_0 ergibt sich aus der Messung?
- Bei unverändertem Versuchsaufbau soll jetzt die Frequenz des Generators vergrößert bzw. verkleinert werden. Geben Sie jeweils eine Frequenz an, bei der das Mikrofon ein Lautstärkeminimum registrieren würde.

A 3.7 Zwei Schallstrahler S_1 und S_2 sind so an einen Tonfrequenzgenerator angeschlossen, daß sie stets mit der gleichen Frequenz von 1360 Hz und in gleicher Phase schwingen. Die Schallstrahler sind 90 cm voneinander entfernt. Ein Mikrofon M wird auf einer Geraden g verschoben, die senkrecht auf der Verbindungslinie von S_2 und S_1 steht und durch S_1 geht (vgl. Skizze). Die Schallgeschwindigkeit soll dabei $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ betragen.

- Begründen Sie, daß es für das Mikrofon einen größten Abstand $S_{1,max}$ vom Schallstrahler S_1 gibt, bei dem das Mikrofon ein Lautstärkeminimum registriert.
- Bestimmen Sie diesen größten Abstand.
- Wie viele Stellen gibt es auf der Geraden g insgesamt, an denen das Mikrofon ein Minimum registriert?



A 3.8 Ein Musikliebhaber hat beim Aufbau seiner neuen HiFi-Anlage die Aufbauhinweise nicht genau beachtet. Er hat die beiden Lautsprecher so angeschlossen, daß ihre Membranen bei einem bestimmten Testton gegenphasig schwingen (Verpolung beim Anklemmen eines der beiden Lautsprecher). Er hat jetzt von beiden Lautsprechern den gleichen Abstand und hört Musik.

- Was besagen die Überlegungen zur Zweistrahlinterferenz für diesen „Versuchsaufbau“?

Unser Musikfreund findet in der Bedienungsanleitung zu seiner neuen Anlage folgenden Vorschlag zur Überprüfung der Lautsprecheranschlüsse: „Stellen Sie die beiden Lautsprecher dicht nebeneinander auf. Schalten Sie das Gerät auf Mono. Nun vertauschen Sie die beiden Adern an dem einen Lautsprecheranschluß. Wird die Baßwiedergabe kräftiger, so ist der neue Anschluß richtig, wird sie schwächer, war der vorige Anschluß richtig.“

- Diskutieren Sie die einzelnen Anweisungen in diesem Auszug aus der Bedienungsanleitung.

A 3.9 Zur Bestimmung der Wellenlänge einer bestimmten Lichtsorte wird ein Biprismaversuch durchgeführt. Die beiden virtuellen Spalte werden mit einer Sammellinse abgebildet. Folgende Meßwerte werden ermittelt:

Abstand Spalt - Linse: 20 cm,

Abstand Linse - Schirm: 5,10 m,

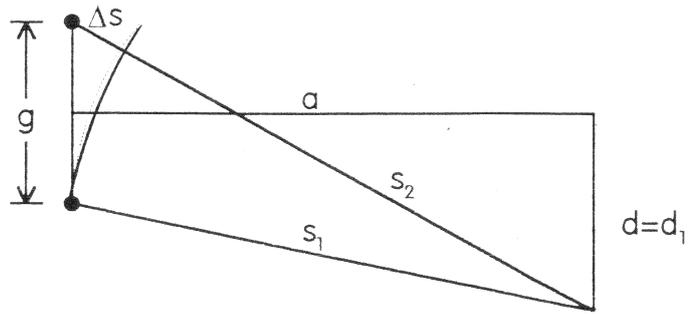
Abstand der Spaltbilder auf dem Schirm: 9 mm.

Nach Entfernen der Sammellinse werden die Interferenzstreifen untersucht und ausgemessen:

Abstand Maximum 2. Ordnung - Maximum 0. Ordnung: 1,8 cm.

Welche Wellenlänge ergibt sich aus den Meßwerten?

A 3.10 Wir haben mehrfach aus g (Abstand der „Sender“), a (senkrechter Abstand zum „Empfänger“) und d (Abstand der Maxima) den Gangunterschied Δs (hier gleich λ) ausgerechnet. Es läßt sich auch jede andere der vier Größen bei Kenntnis der übrigen drei bestimmen.



Sind z.B. a , d_1 und λ gegeben, so läßt sich g ausrechnen. Die folgende Gleichung ergibt sich aus den Gleichungen für s_2 , s_1 und Δs :

$$g = \sqrt{\frac{a^2 + d^2 - \frac{\lambda^2}{4}}{\frac{d^2}{\lambda^2} - \frac{1}{4}}}$$

Die Ableitung dieser Gleichung ist etwas kompliziert und soll hier nicht durchgeführt werden.

Jemand hat den Biprisma-Versuch mit Laserlicht durchgeführt ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$). Für den Abstand benachbarter Interferenzstreifen hat er auf einem 4 m entfernten Schirm $3,0 \text{ mm}$ gemessen. Er will nun berechnen, wie weit die beiden virtuellen Spalte bei diesem Versuchsaufbau voneinander entfernt waren.

- Berechnen Sie die einzelnen Summanden unter dem Wurzelzeichen in der angegebenen Gleichung.
- Welcher Wert ergibt sich für g ?
- Bei einem Vergleich der einzelnen Summanden fällt auf, daß man die gegebene Gleichung für dieses Anwendungsbeispiel im Rahmen der Meßgenauigkeit vereinfachen kann. Vereinfachen Sie die gegebene Gleichung in diesem Sinne soweit wie möglich.
- Berechnen Sie g mit Hilfe dieser vereinfachten Gleichung und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem von b).
- Die gegebene Gleichung darf natürlich nicht immer so vereinfacht werden. Belegen Sie diese Aussage für einen Interferenzversuch mit Schallwellen. Dabei sei: $a = 1,0 \text{ m}$, $d_1 = 90 \text{ cm}$ und $\lambda = 34 \text{ cm}$.

Lösungen

zu A 3.1

Es ist zweckmäßig, die drei Diagramme untereinander zu zeichnen und mit senkrechten Linien gleiche Zeitpunkte zu kennzeichnen.

Zunächst kann man die Zeitpunkte betrachten, bei denen einer der beiden Summanden null ist:

Wenn $s_{y_2} = 0$ ist,

gilt $s_y = s_{y_1}$

(Markierung x)

Jetzt kann man die Zeitpunkte betrachten, bei denen s_{y_1} und s_{y_2} dem Betrage nach gleich sind, aber unterschiedliches Vorzeichen haben.

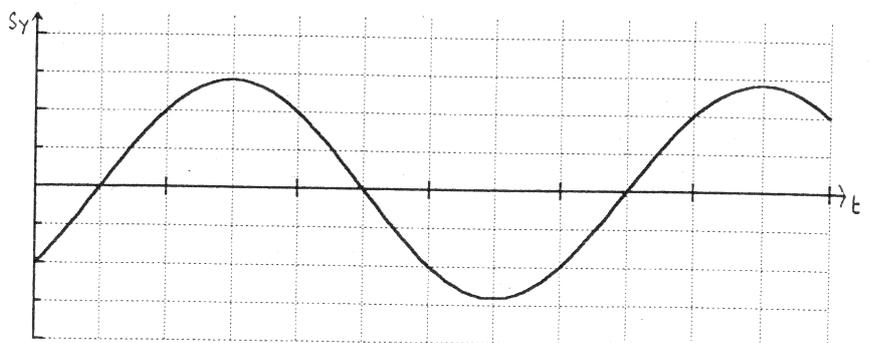
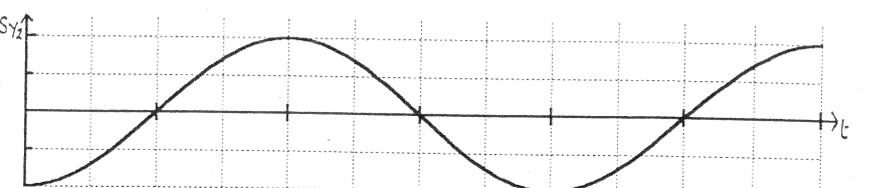
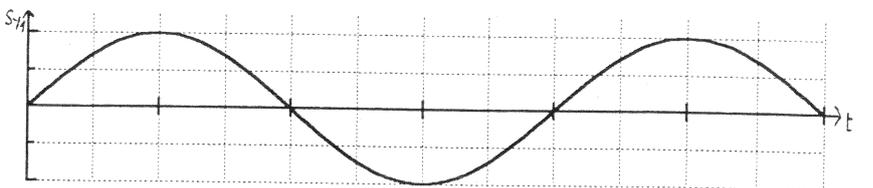
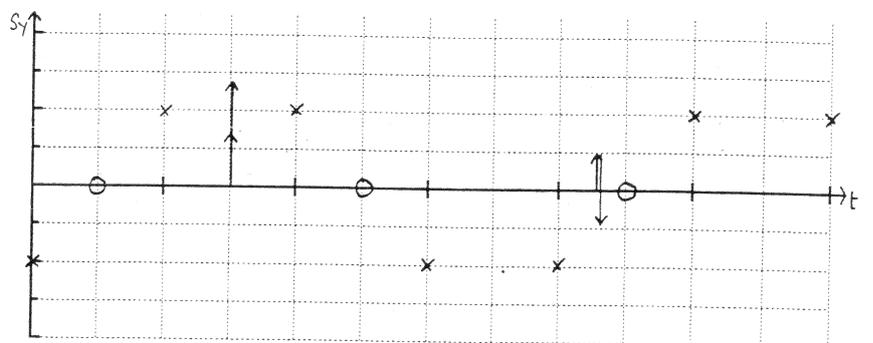
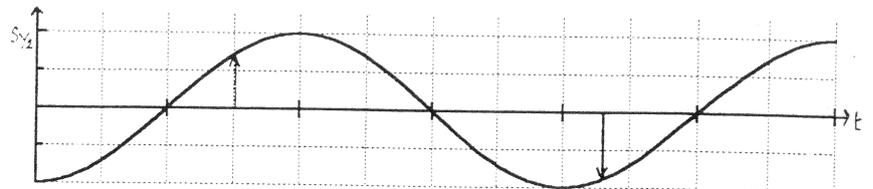
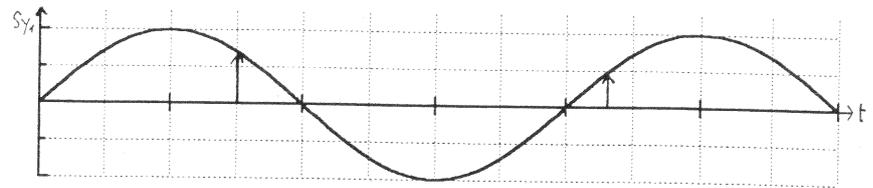
Dann gilt für die Summe: $s_y = 0$ (Markierung o)

Für alle anderen Zeitpunkte läßt sich s_y durch Ausmessen von s_{y_1} und s_{y_2} und Addieren finden:

$$s_y = s_{y_1} + s_{y_2}$$

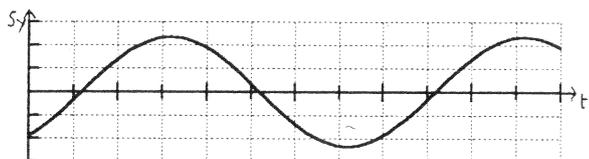
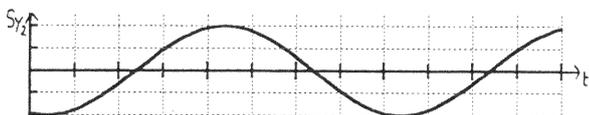
Bei der Addition ergibt sich stets wieder eine Sinuskurve.

Diese Aussage wird in diesem Unterrichtsgang nicht mathematisch begründet.

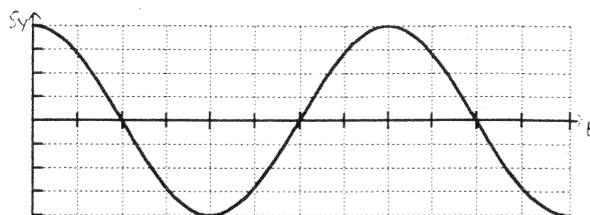
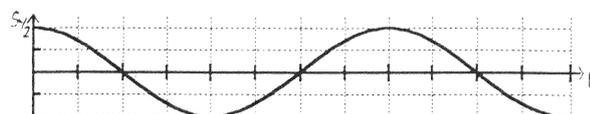
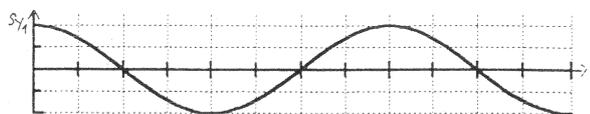


zu A 3.2

a)

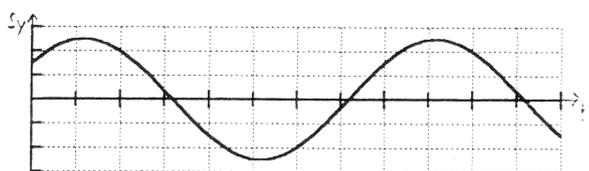
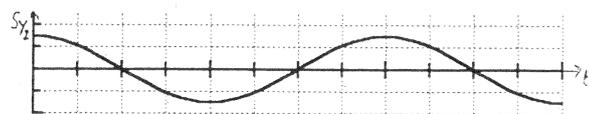


b)

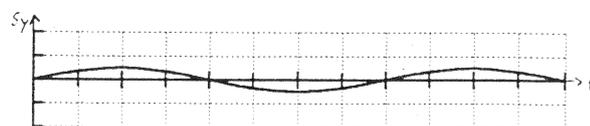
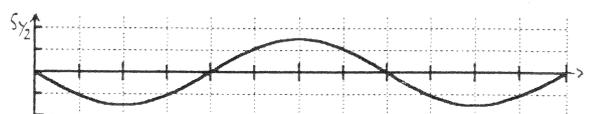
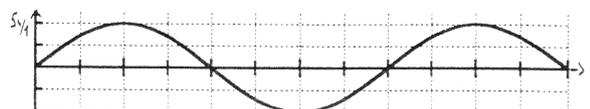


Hier ergibt sich maximale Verstärkung
(Verdopplung der Amplitude)

c)



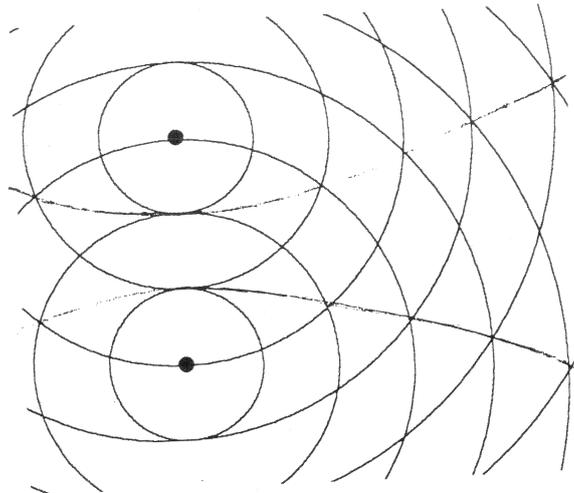
d)



Bei gleichen Amplituden der Teilschwin-
gungen hätte sich hier völlige Aus-
löschung ergeben ($s_y = 0$)

zu A 3.3

Über Hyperbeln muß in diesem Zusammenhang nicht gesprochen werden.



zu A 3.4 Der Gangunterschied kann maximal 50 cm betragen. Es ist: $z \leq \frac{50 \text{ cm}}{18 \text{ cm}} = 2,78$.

Man kann fünf Maxima beobachten: das Maximum nullter Ordnung, zwei Maxima erster und zwei Maxima zweiter Ordnung.

Man kann sechs Lautstärke-Minima registrieren, je zwei für einen Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3}{2} \cdot \lambda$, $\frac{5}{2} \cdot \lambda$

zu A 3.5 a) Es gilt: $s_2 = \sqrt{(30 \text{ cm})^2 + (12 \text{ cm} + 3 \text{ cm})^2} = 33,5 \text{ cm}$

und: $s_1 = \sqrt{(30 \text{ cm})^2 + (12 \text{ cm} - 3 \text{ cm})^2} = 31,3 \text{ cm}$

Damit folgt: $\Delta s = 2,2 \text{ cm}$ und $\lambda = 1,1 \text{ cm}$.

b) Aus c und λ ergibt sich $f = 30,9 \text{ kHz}$.

zu A 3.6 a) $\Delta s = \sqrt{(1,8 \text{ m})^2 + (1 \text{ m})^2} - 1,8 \text{ m} = 25,9 \text{ cm}$

b) Der Gangunterschied muß ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein: $\Delta s = z \cdot \lambda_0$.

c) Es muß gelten: $z = 3 \text{ cm}$, denn: $24 \text{ cm} < 3 \cdot \lambda_0 < 27 \text{ cm}$.

Für die Wellenlänge ergibt sich: $\lambda_0 = \frac{25,9 \text{ cm}}{3} = 8,63 \text{ cm}$.

d) Bei Vergrößerung der Frequenz wird die Wellenlänge kleiner. Das erste Minimum erhalten wir, wenn der Gangunterschied $3 \frac{1}{2} \lambda$ beträgt.

Aus $f_1 \cdot \lambda_1 = f_0 \cdot \lambda_0$ und $3 \frac{1}{2} \cdot \lambda = 3 \cdot \lambda_0$ folgt $f_1 = \frac{7}{6} \cdot f_0 = 4 \text{ 630 Hz}$.

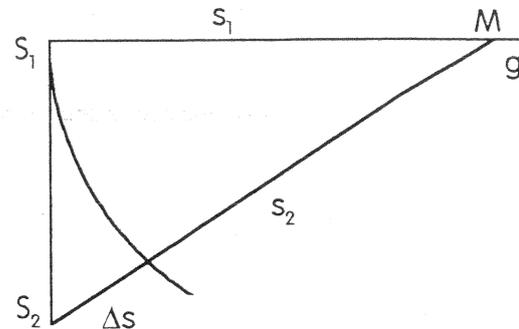
Analog erhält man die weiteren Werte.

Vergrößerung der Frequenz: 4 630 Hz, 5 960 Hz, 7 280 Hz,

Verkleinerung der Frequenz: 3 310 Hz, 1 990 Hz, 662 Hz.

zu A 3.7 a) Je weiter sich das Mikrofon auf der Geraden g von den Schallstrahlern entfernt, desto kleiner wird der Gangunterschied. Der kleinste Gangunterschied, bei dem das Mikrofon ein Lautstärke-Minimum registriert, ist $\frac{1}{2} \cdot \lambda$. Dazu gehört der gesuchte größte Abstand $s_{1,max}$.

Daß der Gangunterschied bei Vergrößerung von s_1 kleiner wird, muß nicht weiter begründet werden. Diese Aussage ist aber - auch ohne Rechnung - leicht einzusehen, wenn man den Kreis um M durch S_1 betrachtet. Der Abstand des Punktes S_2 vom Kreis wird bei Vergrößerung des Kreisradius' s_1 kleiner.



Mögliche Rechnung:

$$\begin{aligned} \Delta s &= s_2 - s_1 \\ \Leftrightarrow \Delta s &= \sqrt{s_1^2 + (90 \text{ cm})^2} - s_1 \\ \Leftrightarrow \Delta s + s_1 &= \sqrt{s_1^2 + (90 \text{ cm})^2} && \text{(es werden nur positive Strecken betrachtet)} \\ \Leftrightarrow (\Delta s)^2 + 2 \cdot \Delta s \cdot s_1 &= (90 \text{ cm})^2 \\ \Leftrightarrow \Delta s \cdot (\Delta s + 2 \cdot s_1) &= (90 \text{ cm})^2 \end{aligned}$$

Diese Gleichung gilt für jeden Abstand s_1 und den zugehörigen Gangunterschied Δs . Wird s_1 größer, muß Δs kleiner werden.

b) Aus Geschwindigkeit und Frequenz ergibt sich die Wellenlänge:

$$\lambda = 0,25 \text{ m.}$$

Mit $\frac{1}{2} \cdot \lambda = 12,5 \text{ cm} = \Delta s$ folgt aus

$$(\Delta s)^2 + 2 \cdot \Delta s \cdot s_1 = (90 \text{ cm})^2 \quad \text{(vgl. Teil a)}$$

$$s_{1,max} = \frac{(90 \text{ cm})^2 - (12,5 \text{ cm})^2}{2 \cdot 12,5 \text{ cm}} = 3,18 \text{ m}$$

c) Da der Gangunterschied höchstens 90 cm betragen kann, gibt es auf der Halbgeraden vier, auf der Geraden g acht Stellen, an denen ein Lautstärke-Minimum registriert werden kann. Eine Rechnung wie bei b) würde die Lage der betreffenden Stellen auf der Geraden g ergeben.

$\frac{\Delta s}{\lambda}$	$\frac{\Delta s}{\text{cm}}$	$\frac{s_1}{\text{cm}}$
0,5	12,5	318
1,5	37,5	89,3
2,5	62,5	33,6
3,5	87,5	2,54

zu A 3.8 a) Für jeden Ton, der von beiden Lautsprechern gleich stark ausgestrahlt wird, ergibt sich am Punkt P Auslöschung. Das ist unabhängig von der Frequenz des Tones. Da sich unser Musikliebhaber sicher in einem Raum

befindet, bei dem die Wände nicht mit schallschluckendem Material verkleidet sind, wird er alle Töne nach einer Reflexion an den Wänden hören können. Bei den geringen Schall-Laufzeiten wird er das als Laie vielleicht gar nicht merken.

- b) In der Bedienungsanleitung werden Angaben gemacht über
- den Abstand der beiden Lautsprecher (dicht nebeneinander),
 - die von beiden Lautsprechern ausgestrahlten Wellen (Mono),
 - die Wellenlänge (Baßwiedergabe),
 - die Gleich- bzw. Gegenphasigkeit der beiden Membranschwingungen (Vertauschen der Adern an einem Lautsprecheranschluß).

Bei einem tiefen Ton ergibt sich für einen geringen Abstand zwischen den Lautsprechern in einem großen Winkelbereich Verstärkung bzw. Abschwächung.

Dieser Effekt ist bei Mono-Einstellung am deutlichsten wahrzunehmen.

Beispiel:

Bei $f = 100$ Hz beträgt die Wellenlänge $3,4$ m. Wählt man $g = 30$ cm, so ist $g \ll \lambda$.

Der Gangunterschied kann maximal 30 cm betragen, $\Delta s \ll \frac{1}{2} \cdot \lambda$.

zu A 3.9 Zunächst läßt sich g mit Hilfe der Abbildungsgleichung berechnen:

$$g = \frac{9 \text{ mm} \cdot 20 \text{ cm}}{5,10 \text{ m}} = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,353 \text{ mm}$$

Berechnet man jetzt s_1 und s_2 , so findet man wieder, daß sich im Rahmen der Meßgenauigkeit ergibt: $s_1 = s_2 = a$.

Aus $(s_2 + s_1) \cdot (s_2 - s_1) = 2 \cdot g \cdot d_2$ folgt mit $(s_2 + s_1) = 2 \cdot a$ und $(s_2 - s_1) = 2 \cdot \lambda$:
 $2 \cdot a \cdot 2 \cdot \lambda = 2 \cdot g \cdot d_2$.

$$\begin{aligned} \text{Für die Wellenlänge ergibt sich: } \lambda &= \frac{g \cdot d_2}{2 \cdot a} = \frac{3,53 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot 1,8 \text{ cm}}{2 \cdot 5,30 \text{ m}} \\ &= 5,99 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 599 \text{ nm} \end{aligned}$$

zu A 3.10

a) Für die einzelnen Summanden ergibt sich:

$$a^2 = 16 \text{ m}^2, \quad d^2 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2, \quad \frac{\lambda^2}{4} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2, \quad \frac{d^2}{\lambda^2} = 2,25 \cdot 10^7$$

b) Mit diesen Werten folgt für den Abstand g der virtuellen Spalte: $g = 0,843$ mm.

c) Im Zähler ist a^2 , im Nenner ist $\frac{d^2}{\lambda^2}$ sehr viel größer als die anderen Summanden.

$$\text{Vernachlässigen wir diese anderen Summanden, so folgt: } g = \sqrt{\frac{a^2 \cdot \lambda^2}{d^2}} = \frac{a \cdot \lambda}{d}$$

d) Nach der vereinfachten Gleichung ergibt sich: $g = 0,844$ mm.

e) Diese Gleichungsvereinfachung darf natürlich nur vorgenommen werden, wenn s_1 und s_2 im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich sind. Das ist bei den hier gegebenen Werten nicht der Fall ($s_2 = 1,53$ m, $s_1 = 1,19$ m). Nach der angegebenen Gleichung ergibt sich: $g = 0,514$ m. Die Rechnung nach der vereinfachten Gleichung (vgl. c) würde den zu kleinen Wert von $0,378$ m ergeben.

4. Beugung und Interferenz

4.1 Inhalte

- Wellenausbreitung um ein Hindernis
- Unterschied zwischen Beugung und Brechung
- Beugungsinterferenz
- Wellenlängenbestimmung
- Entstehung von Spektren

Bemerkungen:

Es werden hier Interferenzerscheinungen behandelt, die durch Beugung entstehen. Quantitativ wird nur die Beugung beim Doppelspalt und beim Gitter besprochen. Dafür wird die Theorie vom 3. Kapitel verwendet. Die Phänomene Beugung und Brechung müssen deutlich voneinander unterschieden werden. Die Beugung wird wieder in verschiedenen Phänomenbereichen untersucht. Verschiedene Spektren werden gezeigt.

Das Thema Beugung und Interferenz bietet viele Möglichkeiten, naturwissenschaftsgeschichtliche Aspekte deutlich zu machen. Nicht die bloße Erwähnung der Namen und Lebensdaten von Forschern, sondern die Vermittlung von Einblicken in die Bedeutung ihres Schaffens und das Aufspüren historischer Entwicklungsstufen lassen Schülerinnen und Schüler die Physik als ein fortschreitendes Bemühen um rationale Erfassung der Naturvorgänge „erleben“. Der Unterricht lebt davon, daß nicht nur Ergebnisse und Fakten, sondern darüber hinaus auch Einsichten in das Prozeßhafte der Wissenschaft vermittelt werden. Ein neues Interesse für Naturwissenschaft kann hier geweckt werden.

4.2 Unterrichtsgang

- 18. Stunde: das Phänomen der Beugung
- 19. Stunde: Beugung und Interferenz von gebeugten Wellen
- 20. Stunde: Doppelspalt - Versuch mit Licht
- 21. Stunde: Gitter - Versuche mit Licht
- 22. Stunde: Spektren

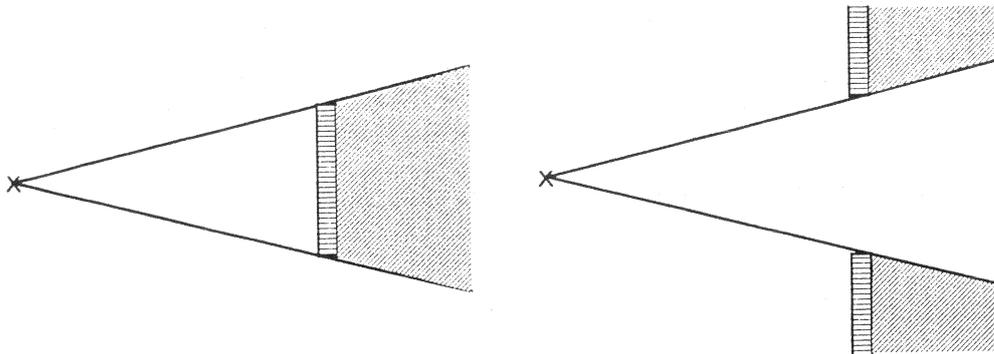
4.3 Hinweise zu den Stunden

18. Stunde:

Mit der Einführung und der Erklärung des Phänomens der Beugung lernen die Schülerinnen und Schüler, im Gegensatz zur geometrischen Optik der Mittelstufe,

- daß Licht im geometrischen Schattenraum auftreten kann,
- daß ein Lichtbündel nicht beliebig eng gemacht werden kann.

Am Anfang der Stunde werden die Begriffe Lichtstrahl und Schattenraum an den Beispielen Hindernis und Spalt wiederholt (Experimente sind hier nicht erforderlich; es genügen Tafelzeichnungen).



Ein Experiment soll jetzt die Grenzen des Modells „Strahlenoptik“ aufzeigen:

Ein Laser-Strahl wird durch einen zunächst breiten Spalt geschickt. Man erkennt, daß das Lichtbündel bei enger werdendem Spalt „auseinanderfließt“.⁹⁾ Licht breitet sich also nicht nur geradlinig aus, es ist auch dort zu sehen, wo nach den Gesetzen der geometrischen Optik Schatten sein sollte. Analog kann ein Versuch mit einem Hindernis gezeigt werden.

Als Definition wird festgehalten: Unter Beugung versteht man die Tatsache, daß Wellen, die sich in einem homogenen Medium ausbreiten, die geometrische Schattengrenze überschreiten, wenn sie an Hindernissen vorbei- oder durch Öffnungen hindurchlaufen.

Das Phänomen der Beugung wird bei Wasserwellen untersucht (parallele Wellenfronten, keine Kreiswellen, an Hindernis und Öffnung). Die Beugungserscheinung wird um so deutlicher beobachtbar sein, je enger die Öffnung bzw. je schmaler das Hindernis wird. Die Analogie zu den Versuchen mit Licht wird herausgestellt. Das Verhältnis zwischen Breite des Hindernisses und der Wellenlänge kann durch Veränderung der Erregerfrequenz variiert werden.

Auf den Unterschied zur Brechung sollte besonders deutlich hingewiesen werden. Richtungsänderungen von Wellen treten auch bei der Reflexion und der Brechung auf. Dort treffen die Wellen auf Hindernisse auf, oder sie durchlaufen die Grenzschicht zwischen verschiedenen Medien; die neue Ausbreitungsrichtung ist eindeutig festgelegt (Reflexions- bzw. Brechungsgesetz). Bei der Beugung laufen die Wellen im homogenen Medium am Hindernis vorbei und dann in viele neue Richtungen weiter.

Als Hausaufgabe soll folgende Frage beantwortet werden: Wie läßt sich die Beugung bei Schallwellen nachweisen?

19. Stunde:

Die Definition der Beugung und die Unterschiede zur Brechung werden wiederholt. Das als Hausaufgabe gestellte Problem wird besprochen. Die Beugung bei Schallwellen wird deshalb im Alltag kaum auffallen, weil diese Erscheinung häufig durch Reflexionserscheinungen überlagert wird. Man muß „Versuchsaufbauten“ wählen, bei denen störende Reflexion vermieden wird. Man kann z. B. „um“ eine Ecke eines frei stehen-

⁹⁾ Interferenzerscheinungen am Spalt sollten hier möglichst nicht gezeigt werden.

den Hauses oder aus einem langen Kellergang oder Flur durch eine Tür nach draußen rufen. Mit Ultraschall lassen sich diese Versuche im Unterrichtsraum durchführen (vgl. D 4.1). In Analogie zu den Versuchen mit der Wellenwanne wird die Beugung von Ultraschallwellen bei einem Hindernis und bei einer Öffnung untersucht. Auch hier soll in erster Linie das Phänomen der Beugung betrachtet werden. Auf die dabei auftretenden Interferenzerscheinungen soll hier nicht eingegangen werden. Sie sind schwer zu beobachten und ohne das Huygenssche Prinzip nicht erklärbar.

Dagegen kann die Interferenz der gebeugten Wellen beim Doppelspaltversuch gut beobachtet und mit der bisherigen Theorie zur Zweistrahlinterferenz erklärt werden. Es bieten sich Versuche mit Ultraschall (vgl. D 4.2) und mit Wasserwellen an.

Als Ergebnisse dieser Stunde werden festgehalten:

- Beugungsinterferenz ist sowohl bei Ultraschall als auch bei Wasseroberflächenwellen beobachtbar.
- Die Beugungsinterferenz bei zwei Öffnungen läßt sich in gleicher Weise behandeln wie die Zweistrahlinterferenz bei zwei Erregern.

20. Stunde:

In dieser Stunde wird die Beugungsinterferenz am Doppelspalt mit Licht behandelt. Als Lichtquelle eignet sich ein Laser, dessen enges Lichtbündel aufgeweitet wird. In einer Entfernung von 2 m bis 5 m hinter dem Doppelspalt können die Schülerinnen und Schüler ein Interferenzmuster entdecken, das aus parallelen hellen und dunklen Streifen besteht.

Dieser optische Doppelspaltversuch ist in Analogie zu den Doppelspaltversuchen für Schallwellen und Wasseroberflächenwellen aufgebaut.

Er liefert die folgenden Erkenntnisse:

- Der Doppelspaltversuch gibt uns über den Versuch mit dem Biprisma hinaus einen weiteren Hinweis für die Wellennatur des Lichtes, da Interferenz nur im Wellenmodell gedeutet werden kann.
- Die Wellenlänge des Laserlichtes könnte aus dem Interferenzmuster der gebeugten Wellen mit der bisherigen Theorie zur Zweistrahlinterferenz bestimmt werden.
- Die Beobachtung des Interferenzmusters zeigt, daß die Intensität des Lichtes nur ganz allmählich von ihrem größten Wert in einem Maximum auf den im benachbarten Minimum folgenden Wert Null abnimmt. Die Maxima sind nicht scharf. Aus diesem Grund wird hier auf eine Wellenlängenbestimmung verzichtet.

In einem Kurzvortrag (evtl. Schülervortrag) sollte nun der Gruppe die historische Bedeutung des optischen Doppelspaltversuches und die Genialität seines Erfinders nahegebracht werden (siehe unten).

Untersuchungen von Licht mit einem Doppelspalt stellen den Beobachter vor zwei Probleme: Die Maxima sind unscharf, und ihre Helligkeit ist nur gering. Die beiden Spalte lassen nur wenig Licht hindurch. Bei gewöhnlichen Lichtquellen verringert der notwendige Beleuchtungsspalt zusätzlich die Helligkeit des Interferenzmusters. Ersetzt man jetzt den Doppelspalt durch einen Mehrfachspalt, ein sogenanntes optisches Strichgitter, so treten die beiden Probleme des Doppelspaltversuches nicht mehr auf.

Der Intensitätszuwachs in den Maxima ist wegen der großen Anzahl der Spaltöffnungen unmittelbar verständlich; die Schärfe der Maxima ist überraschend und bedarf einer Erklärung.

Bemerkungen zur Geschichte:

Dem englischen Arzt **Thomas Young** (1773, Milverton/Somerset, - 1829, London) gelang es 1802 als erstem, die Wellenlänge von Licht zu messen, und zwar verwendete er dazu ein Doppelloch. Die räumliche Kohärenz des Lichtes erzwang er mit einem engen Beleuchtungsspalt. Young hatte zuvor die Wellenwanne erfunden; er veranschaulichte an Wasseroberflächenwellen, wie sich verschiedene Wellenzüge verstärken und auslöschen. Seit 1801 wagte er es, an der Richtigkeit der Newtonschen Emissionstheorie zu zweifeln, nach der das Licht aus kleinen Körperchen besteht. *„So sehr ich den Namen Newtons verehere, bin ich darum doch nicht verpflichtet zu glauben, daß er unfehlbar war. Ich sehe ... mit Bedauern, daß auch er sich irren konnte und daß seine Autorität den Fortschritt der Wissenschaft manchmal vielleicht sogar verzögert hat.“*

Young vertrat die Ansicht, daß Licht als eine (sich im Weltäther fortpflanzende) Wellenbewegung aufzufassen sei. Sein Doppellochversuch stützte diese Hypothese. Der Fresnelsche Biprismaversuch, der erst 18 Jahre später (1820) erfunden wurde, war ein weiteres Indiz für diese Hypothese. Fresnel wollte allerdings durch den Biprismaversuch den französischen Newtonianern beweisen, daß Lichtwellen auch dann interferieren, wenn Beugung am Vorgang nicht beteiligt ist.

Young war ein unermüdlicher Forscher. Als junger Arzt entdeckte er 1793 das Prinzip der Akkomodation und 1801 die Ursache des Astigmatismus des Auges. 1817 gab er den Anstoß, Licht als eine transversale Welle aufzufassen. Er entwickelte eine Dreifarbentheorie des Sehens, die von Helmholtz weitergeführt wurde. Young beherrschte im jugendlichen Alter schon neun Sprachen; seine Genialität zeigte sich auch in seinen Beiträgen zur Musik und Malerei. Sogar bei der Entzifferung der ägyptischen Hieroglyphen wirkte er mit.

Der Jesuitenpater **Franzesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663, Bologna), Physiker und Mathematiker, schildert in seinem 1665 erschienenen Werk „*Physico - mathesis de lumine, coloribus et iride, aliusque annexis*“ (Physiklehre über Licht, Farben und Regenbogenfarben und andere verwandte Dinge) eine Beobachtung, die einen Vorläufer des Youngschen Doppellochversuchs darstellt. Grimaldi erzeugt in einem verdunkelten Zimmer durch zwei nahe Öffnungen zwei Sonnenbildchen, deren Ränder sich zum Teil überschneiden; er beobachtet, daß der Rand jedes Sonnenscheibchens als dunkler Streifen über das andere Sonnenbildchen zieht. Da an diesen dunklen Streifen Licht zu Licht gefügt, nicht Aufhellung, sondern Verdunklung eintritt, schließt er: *„lumen aliquando, per sui communicationem reddit obscuriorem superficiem corporis aliunde primus illustratum“* (Licht ergibt gelegentlich bei einer Überlagerung mit sich selbst eine dunklere Oberfläche eines Körpers als bei einer einfachen Beleuchtung.) „Leider“ beruhte diese Beobachtung Grimaldis nicht auf der vermuteten physikalischen Erscheinung, sondern auf einer physiologischen Reaktion der menschlichen Netzhaut. Richtige Beobachtung und falsche Deutung, richtige Vermutung und Deutung bei falsch gedeuteter Beobachtung - ein kuriose physikalisches Ereignis.

Richtige Beobachtung und richtige Deutung gelangen Grimaldi bei dem folgenden Versuch: Er läßt in seinem verdunkelten Zimmer durch eine feine Öffnung Licht einfallen und bringt Schirme verschiedener Größe und Nadeln unterschiedlicher Dicke in den Lichtstrahl; dabei bemerkt er, daß der Rand des Lichtbündels stark verwaschen ist und daher von einer geradlinigen Ausbreitung des Lichtes keine Rede mehr sein kann. *„lumen propagatur seu diffunditur non solum directe, refracte ac reflexe, sed etiam quodiam quarto modo diffracte.“*

(Licht pflanzt sich fort oder breitet sich aus, nicht nur unmittelbar, gebrochen oder reflektiert, sondern auch auf eine gewisse vierte Art zerstreut.) Grimaldi - der Entdecker der Lichtbeugung; er entwickelte für dieses Phänomen eine Wellentheorie, auf welche sich später **Christian Huygens** (1629 -1695, Den Haag) bezog. Grimaldi - ein Vorläufer von Huygens und Young.

Quellen:

1. Stephan F. Mason
Geschichte der Naturwissenschaft,
Kröner TB 307, Stuttgart, 1961
2. Erich Krumm
Im Zauberreich der Lichtwellen
Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1950
3. Erich Krumm
Versuche in der Wellenwanne
Praxis-Schriftenreihe, Aulis-Verlag
Deubner & Co, Band 8, Köln, 1961
4. Karl Friedrich Weinmann
Die Natur des Lichts
Wissenschaftl. Buchgemeinschaft,
Darmstadt, 1980
5. Fritz Krafft, Adolf Meyer-Abich (Hrg.),
Große Naturwissenschaftler - Biographisches
Lexikon, Fischer Bücherei, Band
6010, Frankfurt, 1970

21. Stunde:

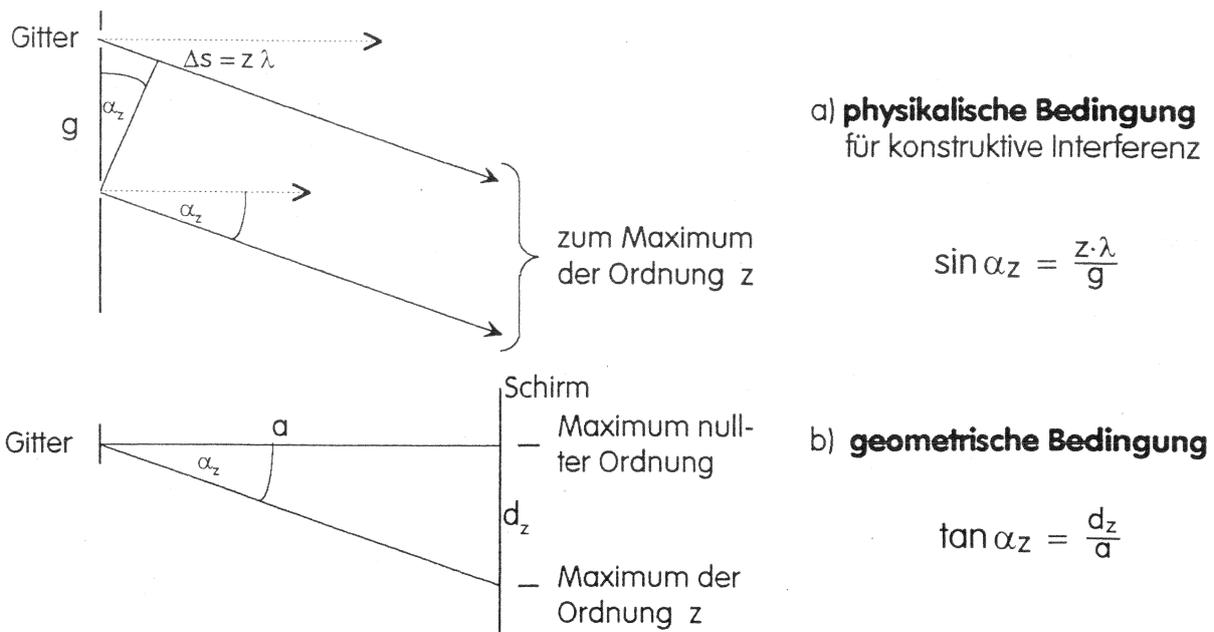
Der am Ende der letzten Stunde vorgeführte Versuch zur Beugung von Laserlicht an einem optischen Strichgitter wird (von Schülerinnen und Schülern) erneut aufgebaut. Vorerst wird nicht das Rowlandgitter, sondern ein Gitter mit der Gitterkonstanten $g = 0,01$ mm verwendet. Dieser Versuch wird mit dem Doppelspaltversuch verglichen:

- Der Intensitätsgewinn gegenüber dem Doppelspaltversuch ist aufgrund der großen Anzahl von Spaltöffnungen des Gitters verständlich.
- Je kleiner der Abstand g der beiden benachbarten Erreger bzw. Spaltöffnungen ist, desto größer wird bei fest gewähltem Abstand a zwischen beugendem Objekt und Beobachtungsebene der Abstand $d_{z+1} - d_z$ benachbarter Maxima. Das kann unmittelbar im Experiment mit unterschiedlichen Strichgittern überprüft werden.
- Die Maxima sind hier schärfer ausgeprägt als beim Doppelspaltversuch. Der weite Bereich zwischen zwei Maxima ist nach Augenschein völlig dunkel.
(In Wirklichkeit ist dieser Bereich von sehr vielen schwächeren Nebenmaxima und -minima ausgefüllt; doch braucht hierauf in der Vorstufe nicht eingegangen zu werden. Auf den Begriff „Hauptmaximum“ kann man daher hier auch verzichten.)

Da die Maxima gut auszumessen sind, können Wellenlängenmessungen mit Hilfe eines Gitters recht genau durchgeführt werden. Die Überlegungen zur Zweistrahlinterferenz werden auf zwei benachbarte Gitteröffnungen angewendet.

Der Abstand a ist sehr groß gegenüber der Gitterkonstante g (im vorliegenden Versuchsaufbau gilt etwa: $a = 100000 \cdot g$); deshalb kann davon ausgegangen werden, daß die sich im Punkt P der Beobachtungsebene treffenden Strahlen praktisch parallel von den Gitterspalten weggehen. (Die Überlegungen gelten auch für die Auswertung des Doppelspaltversuches.)

Bei den auf der nächsten Seite folgenden Bildern sollte betont werden, daß die beiden ähnlichen Dreiecke in sehr unterschiedlichem Maßstab gezeichnet sind.



Die Zusammenfassung beider Bedingungen ist aus zweierlei Gründen nicht zu empfehlen: Zum einen können die Schülerinnen und Schüler nicht mehr zwischen physikalischer und geometrischer Bedingung unterscheiden, da sie diese in der kompakten Gleichung nur schwerlich wiedererkennen, zum anderen ist durch die Zusammenfassung auch keinerlei Vereinfachung zu gewinnen, da bei unseren Experimenten häufig auch größere Beugungswinkel auftreten, bei denen $\sin(\arctan \alpha_z)$ nicht durch α_z ersetzt werden darf.

Die Wellenlänge des Laserlichts soll jetzt experimentell bestimmt werden.

Meßbeispiel: $g = 0,01 \text{ mm}$, $a = 4,25 \text{ m}$, $z = 1$, $d_z = 27,1 \text{ cm}$.

Aus a und d_z ergibt sich der Beugungswinkel α_z ; dann kann die Wellenlänge λ_{ber} berechnet werden:

$$\tan \alpha_1 = \frac{d_1}{a} = \frac{0,271 \text{ m}}{4,25 \text{ m}} = 0,0638 \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = 3,65^\circ$$

$$\lambda_{\text{ber}} = g \cdot \sin \alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \sin 3,65^\circ = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot 0,0637 = 6,37 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 637 \text{ nm}$$

Zum Vergleich: Wellenlänge (auf dem Laser, in der Literatur): $\lambda_{\text{Lit}} = 632,8 \text{ nm}$.

Hier sollte den Schülerinnen und Schülern deutlich gemacht werden, daß eine bisher fast unmeßbar erscheinende Größe - die Wellenlänge des Lichtes - mit den Mitteln der Schulphysik erstaunlich genau gemessen werden kann.

Es empfiehlt sich, auf die Möglichkeiten hinzuweisen, die die beiden oben abgeleiteten Gleichungen bieten: Die der Messung unmittelbar zugänglichen Größen a und d_z liefern den Beugungswinkel. Mit dem Beugungswinkel läßt sich dann

- bei bekannter Gitterkonstante die Wellenlänge des benutzten Lichtes bestimmen (vgl. Meßbeispiel oben),
- bei bekannter Wellenlänge die Struktur des Beugungsobjektes untersuchen (vgl. folgende Hausaufgabe).

Hausaufgabe (vgl. auch A 4.3):

Die Schülerinnen und Schüler sollen mit Hilfe der nun bekannten Wellenlänge des Laserlichts, nämlich $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, die Gitterkonstante eines Rowlandgitters bestimmen. Die Meßgrößen werden am Ende der Stunde ermittelt: $a = 60,0 \text{ cm}$, $z = 1$, $d_z = 23,3 \text{ cm}$.

Bemerkungen:

- Als Gitter, d.h. als System feiner Spalte oder Löcher, können feine Stoffe, Müllergaze, Rasterplatten, Vogelfedern, Rowlandgitter verwendet werden.
- **Joseph von Fraunhofer** (1787, Straubing, - 1826, München) stellte als erster „optische“ Gitter aus einem System von engen Spalten in gleichem Abstand dadurch her, daß er auf zwei parallele, flachgängige Schrauben dünnsten Draht von Windung zu Windung spannte. Er ritzte auch auf Glas, das mit Goldblatt belegt war, mit einer Teilungsmaschine feine Linien und mittels Diamant auf Planglas feinste Ritzen. Sein feinstes Gitter wies 300 Linien je Millimeter auf. Mit seinen einfachen Gittern führte er als erster Wellenlängenmessungen mit einer bis dahin nicht erreichten Genauigkeit aus. J. W. von Goethe ging in seiner Farbenlehre auf diese Arbeiten Fraunhofers ein, doch er erkannte offenbar nicht die Bedeutung dieser Experimente.
- Gitter extrem hoher Güte und mit sehr kleiner Gitterkonstanten stellte ein Schüler von Helmholtz, der amerikanische Physiker **Henry Augustus Rowland** (1848, Honesdale, - 1901, Baltimore) her. Er entwickelte Teilungsmaschinen, bei denen er flachgängige Schrauben äußerster Präzision verwendete. Durch den geringen Vorschub der Schrauben gelang es ihm, auf einer Metallfolie auf einer Länge von 20 cm mit einem Diamanten 110 000 Linien unterzubringen. Nach Rowlands Tod wurden die Teilungsmaschinen nicht wieder in Betrieb genommen; stattdessen wurden von den wertvollen Originalgittern fotografische Reproduktionen hergestellt.
- Bei der Erörterung der Genauigkeit der schulischen λ - Bestimmung sollte nicht der Hinweis fehlen, daß schon vor 100 Jahren die Lichtwellenlängen auf fünf geltende Ziffern genau durch diese Methode der Beugung am Gitter bestimmt werden konnten.
- Das in der Hausaufgabe verwendete Verfahren zur Bestimmung der Gitterkonstante hat sich in Physik und Chemie als äußerst tragfähig erwiesen. Bei der Besprechung der Hausaufgabe kann auf die Bedeutung dieses Verfahrens für die Analyse der räumlichen Struktur von Kristallen (z.B. kubische oder hexagonale Packung der Atome; Max von Laue 1912) und komplizierten Molekülen (z.B. Doppel - Helix - Struktur der DNA; James Watson, Francis Crick, 1953) hingewiesen werden. Der Trick des Verfahrens besteht darin, daß es gelingt, aus der Intensitätsverteilung eines Beugungsbildes bei bekannter Wellenlänge des Lichtes Rückschlüsse auf die Struktur des beugenden Objektes zu ziehen.
Je kleiner die Wellenlänge der benutzten Wellenstrahlung ist (sichtbares Licht, Röntgenstrahlung, Elektronenstrahlen), desto kleinere Abmessungen des beugenden Objektes lassen sich bei diesem Verfahren erkennen.
- Die Schärfe der Maxima kann man den Schülern durch die folgende Überlegung verständlich machen:
Beim Doppelspaltversuch ergibt sich für den Gangunterschied $\Delta s = z \cdot \lambda + \frac{1}{2} \cdot \lambda$ der Beugungswinkel des Minimums, das auf das Maximum der Ordnung z folgt.
Beim Gitter mit $2 \cdot N$ Spaltöffnungen ergibt sich schon bei einem Gangunterschied $\Delta s = z \cdot \lambda + \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \lambda$ für zwei Lichtwellen aus zwei benachbarten Spalten das erste Minimum nach dem Maximum der Ordnung z .
Die Lichtwellen aus dem 1-ten und dem $(N+1)$ -ten, die aus dem 2-ten und dem

(N+2)-ten, ..., die aus dem N-ten und dem (2 · N)-ten Spalt löschen sich restlos aus, da ihr Gangunterschied $N \cdot \Delta s = N \cdot z \cdot \lambda + \frac{1}{2} \cdot \lambda$ beträgt.

Mit wachsender Anzahl der Spaltöffnungen des Gitters werden die Maxima durch immer näher bei ihnen liegende Minima begrenzt.

22. Stunde:

Diese Stunde hat zwei Schwerpunkte: Vergleich von Gitter- und Prismenspektren und die Untersuchung von Gitterspektren diverser Lichtquellen (bei subjektiver Beobachtung).

Zu Beginn der Stunde werden Demonstrationsversuche zum Vergleich von Gitter- und Prismenspektren gezeigt. Beim Aufbau muß darauf geachtet werden, daß der Beleuchtungsspalt zunächst - ohne Gitter bzw. Prisma - scharf auf dem Schirm abgebildet wird. Beide Spektren sollten möglichst gleich breit sein. Die Schülerinnen und Schüler vergleichen die Spektren und stellen Unterschiede fest:

- die Farben erscheinen in den beiden Spektren in umgekehrter Reihenfolge (vgl. Aufgabe A 4.5 bis A 4.8),
- beim Gitterspektrum gibt es mehrere Ordnungen, beim Prismenspektrum nicht (Unterschied: Beugung - Brechung).

Im folgenden Teil der Stunde sollen verschiedene Lichtquellen anhand der von ihnen erzeugten Spektren untersucht werden. Hier bietet sich ganz besonders die subjektive Beobachtungsmethode an. Das läßt sich sowohl mit Prismen als auch mit Gittern durchführen, Gitter sind aber leichter und preiswerter in größerer Anzahl zu beschaffen. Die Schülerinnen und Schüler sollen bei diesen Untersuchungen den Unterschied zwischen einem kontinuierlichen Spektrum und einem Linienspektrum kennenlernen.

Zusätzlich kann untersucht werden:

- ausgedehnte und eng begrenzte Lichtquellen,
- Lichtquellen ohne und mit Beleuchtungsspalt,
- Licht, das von einem Farbfilter durchgelassen wird.

Bemerkungen:

- Literaturhinweis (sehr lesenswert, viele experimentelle Hinweise):

1. Gerd Koppelman u.a., Grundversuche zur Spektroskopie (I),
– Demonstrationen und Schülerübungen mit einfachen Mitteln,
2. Gerd Koppelman, „Take-Home“-Experimente zur Spektroskopie.

Beides in: Praxis der Naturwissenschaften (Physik), Heft 10/82, Aulis-Verlag Deubner & Co KG, Köln.

Dem Heft ist eine Beugungsgitterfolie (4,5 cm · 20 cm; 530 Linien pro Millimeter) beigelegt. Aus ihr lassen sich mehrere in Diarahmen gefaßte Gitter herstellen.

- Im Lehrmittelhandel werden preiswerte in Diarahmen gefaßte Gitter angeboten, z.B.: CONATEX, MT4432, Gitter im Diarahmen, 144 Linien pro mm, etwa 4,-- DM.

- Es versteht sich von selbst, daß der Laser bei subjektiver Beobachtungsmethode nicht als Lichtquelle benutzt wird. Auch das intensive Licht der Hg-Lampe sollte nicht direkt in das Auge fallen. Hier könnte man eine polierte Stativstange beleuchten, die dann als schmale Lichtquelle fungiert.

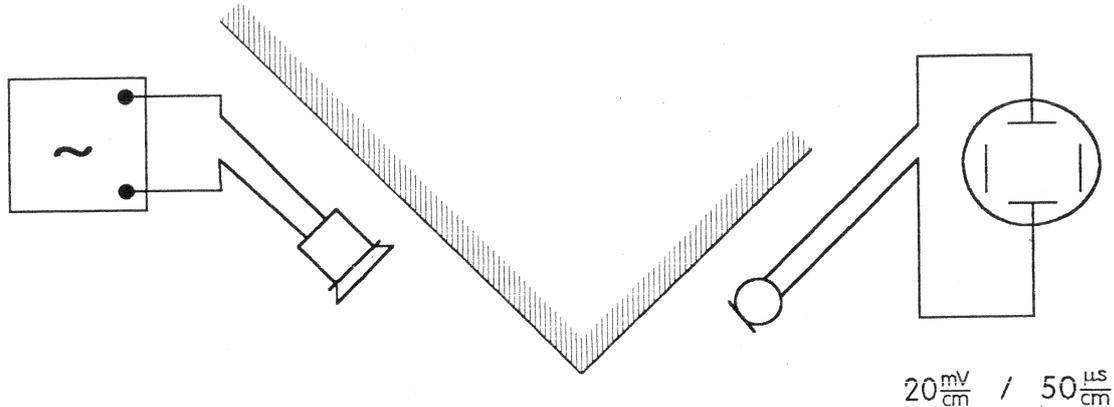
Bei der Besprechung der Linienspektren können folgende historische Hinweise gegeben werden:

- Die Erfindung des engen Beleuchtungspaltes (anstelle des Newtonschen oder Youngschen Loches) durch **William Hyde Wollaston** (1766, Norfolk, - 1828, London) hat die Entwicklung der Spektroskopie entscheidend beeinflusst.
- Durch den Einsatz von Gittern (statt der bis dahin üblichen Prismen) konnten die Beobachtungen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erheblich verfeinert werden. Um 1870 wurde bei der Untersuchung des Sonnenlichtes das „Sonnenelement“ Helium entdeckt. Helium wurde auf der Erde erst 1895 gefunden.
- Das Heidelberger Forscher-Duo **Gustav Robert Kirchhoff** (1824, Königsberg, - 1887, Berlin) und **Robert Wilhelm Bunsen** (1811, Göttingen, - 1899, Heidelberg) erfand 1859 in Gemeinschaftsarbeit das Verfahren der Spektralanalyse. Der Physiker Kirchhoff konstruierte den Spektralapparat (aus einem Prisma und Teilen eines alten Fernrohres), der Chemiker Bunsen übernahm die Reindarstellung der Salze. Ihre Begeisterung über die neue Methode wird in den folgenden Worten deutlich: *„In den Aschen des Tabaks, der Weinblätter, des Rebholzes... und der Feldfrüchte, welche in der Rheinebene... auf nicht granitischem Boden gezogen werden, fehlt das Lithium ebenso wenig, als in der Milch der Tiere, welche mit jenen Feldfrüchten genährt werden.“*
- Die Spektralanalyse nach Kirchhoff-Bunsen stellt eine sehr empfindliche Nachweismethode dar: In der Chemie führte sie zur Entdeckung neuer chemischer Elemente (1860: Cs; 1861: Rb, Th; 1862: In; 1875: Ga; 1879: Sc). Diese Nachweismethode lieferte damit eine glänzende Bestätigung für das um 1869 von **Mendelejeff** (1834, Tobolsk, - 1907, St. Petersburg; 1859 - 1869 Mitarbeiter bei Bunsen) entwickelte periodische System der Elemente, das damals noch „weiße Flecken“ aufwies.
- In der Physik gewann die Spektralanalyse einerseits große Bedeutung durch ihre Anwendung auf das Licht von Sonne und Fixsternen („Weltall-Chemie“); andererseits stellte sie den entscheidenden Schlüssel zur Theorie des Aufbaus der Atome dar und bereitete damit den Weg zur Quantenmechanik.

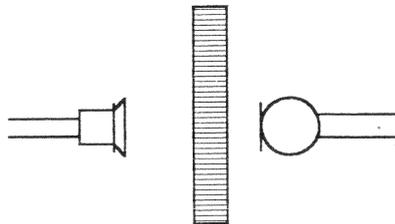
4.4 Demonstrationsversuche

D 4.1 Beugung von Ultraschall

Wird der Ultraschallsender mit einem Generator verstellbarer Frequenz betrieben, so muß diese so eingestellt werden, daß optimale Schwingungen entstehen (Kontrolle mit Empfänger und Oszilloskop). Man will zeigen, daß sich der Schall „um die Ecke“ ausbreitet:

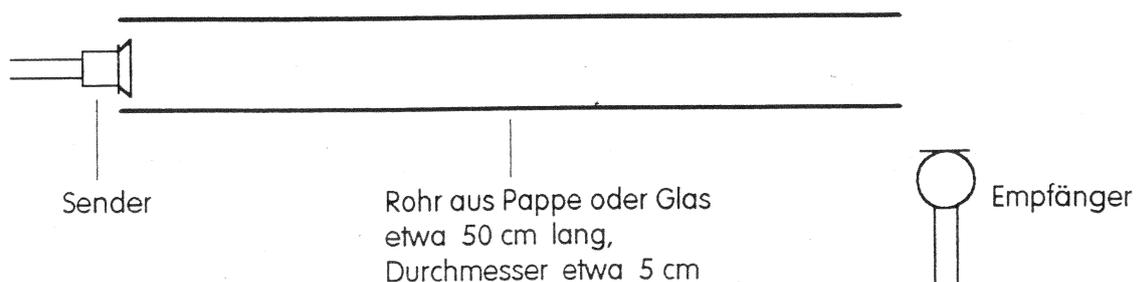


Als „Ecke“ kann ein Holzkasten verwendet werden. Man kann auch zwei Metallschirme (aus der Optik oder von den Versuchen mit cm-Wellen) zu einer Ecke aufstellen. Um auszuschließen, daß sich der Schall durch das aufgebaute Hindernis ausbreitet, muß gezeigt werden, daß die Schallwellen nicht direkt durch Holz oder Metall laufen.



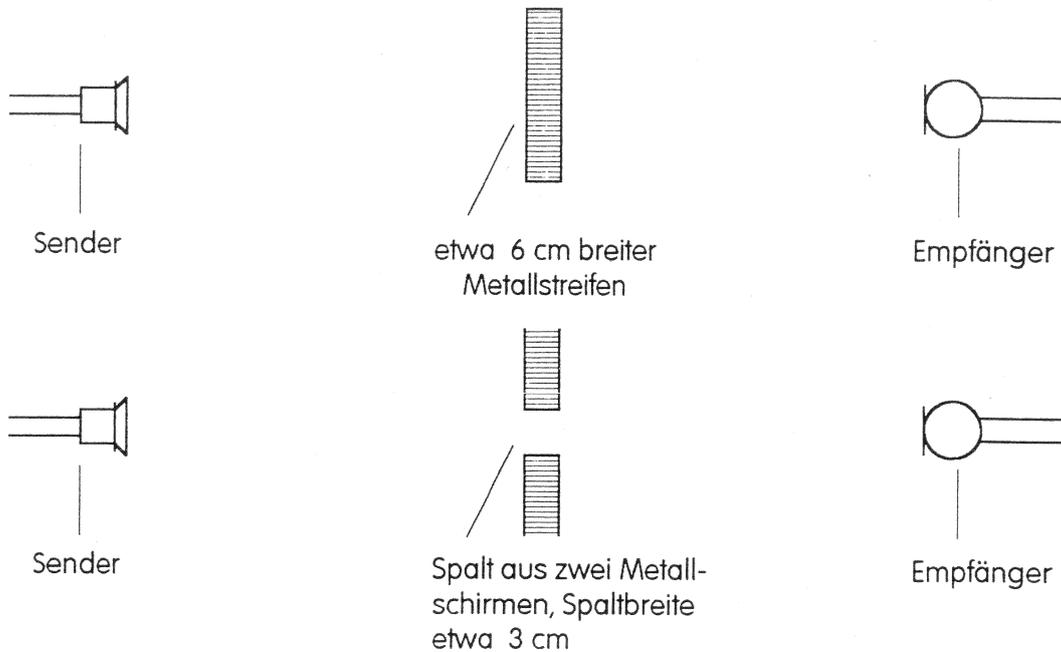
Hinweis: Die Ultraschallwellen sind unter Umständen nicht gut gebündelt. Man darf nicht annehmen, daß der Empfänger keine Wellen mehr registriert, wenn man in dem oben beschriebenen Versuchsaufbau die „Ecke“ entfernt. Die Idee liegt nahe, führt aber höchstens zu Mißverständnissen.

Alternativ kann man folgenden Versuchsaufbau wählen:



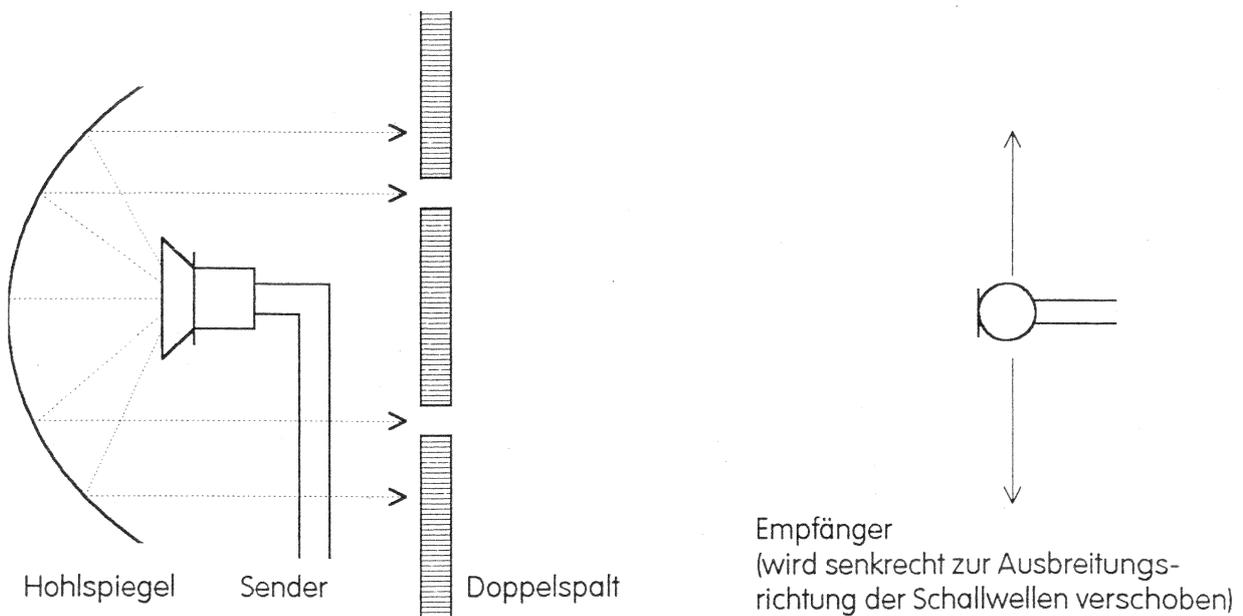
Der Empfänger kann fast im rechten Winkel zum Sender (und zum Rohr) stehen. Aufgrund der Beugung an der Rohröffnung registriert der Empfänger Schallwellen; nimmt man das Rohr weg, so wird die Empfängermembran nicht mehr zu Schwingungen angeregt.

Daß sich Ultraschallwellen in den geometrischen Schattenraum ausbreiten, läßt sich auch analog zu den Versuchen in der Wellenwanne oder zu den Versuchen mit Licht nachweisen:

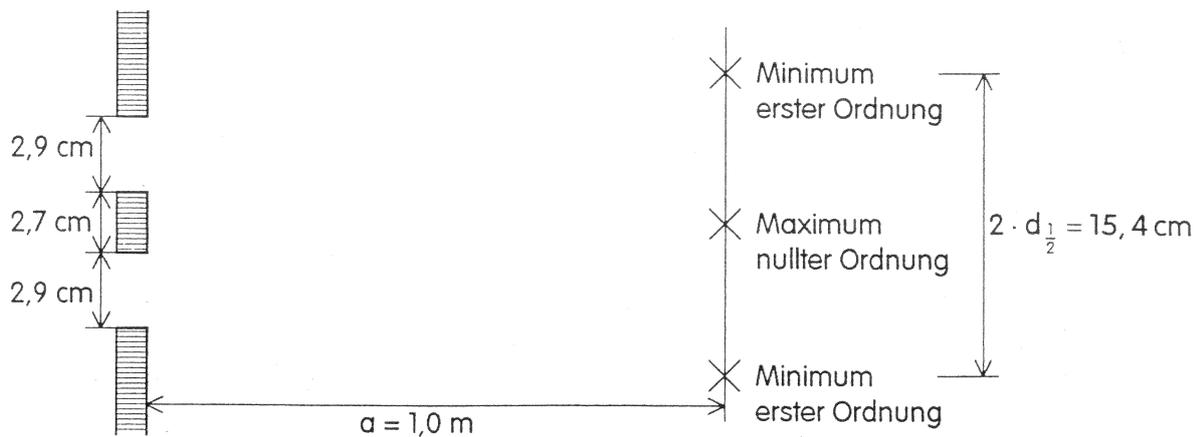


D 4.2 Doppelspaltversuch mit Ultraschallwellen

Der Versuch ist nur auswertbar, wenn man mit Hilfe eines Hohlspiegels ein paralleles Bündel von Ultraschallwellen erzeugt. Bei den angegebenen Abmessungen lassen sich die Maxima nullter und erster Ordnung überzeugend nachweisen.



Meßbeispiel:



Es ist also: $g = 2,9 \text{ cm} + 2,7 \text{ cm} = 5,6 \text{ cm}$, $d_{\frac{1}{2}} = 7,7 \text{ cm}$, $a = 1,0 \text{ m}$.

Damit ergibt sich: $s_2 = 100,55 \text{ cm}$ und $s_1 = 100,12 \text{ cm}$.

Dann folgt: $\Delta s = 0,43 \text{ cm}$; $\lambda = 2 \cdot \Delta s = 0,86 \text{ cm}$.

Zur Kontrolle erhält man mit $f = 38,58 \text{ kHz}$ für die Schallgeschwindigkeit: $c = 332 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Vgl. Versuchsbeschreibung der Firma Leybold-Didactic GmbH.

4.5 Aufgabenbeispiele

(Aufgabe zum Doppelspaltversuch mit Ultraschallwellen: siehe Meßbeispiel bei D 4.2)

A 4.1 Mit Hilfe eines optischen Gitters soll für Licht mit der Wellenlänge 600 nm ein Interferenzmuster erzeugt werden. Wie viele Spalte pro Zentimeter muß das Gitter mindestens haben, damit zwei benachbarte Interferenzlinien auf einem 4 m entfernten Schirm wenigstens 3 mm voneinander entfernt sind?

A 4.2 Wie viele Linien pro Millimeter dürfte ein optisches Gitter höchstens haben (das Rowlandgitter hat 570 Striche pro Millimeter), damit

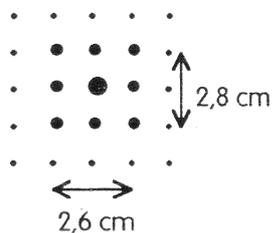
- a) das Maximum 1. Ordnung,
- b) das Maximum 2. Ordnung

für alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes zu beobachten ist?
($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$)

A 4.3 Die Gitterkonstante eines Gitters soll ausgemessen werden. Bei einem Interferenzversuch mit Laserlicht ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) werden folgende Meßgrößen ermittelt: $a = 1,00 \text{ m}$, $d_1 = 38,6 \text{ cm}$, $d_2 = 105,4 \text{ cm}$.

Welche Gitterkonstante ergibt sich?

A 4.4 Laserlicht ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) fällt auf ein Stück Gaze und erzeugt auf einem Schirm in 2,70 m Entfernung folgendes Interferenzmuster:



Bestimmen Sie für die verwendete Gaze die Anzahl der Fäden pro Zentimeter.

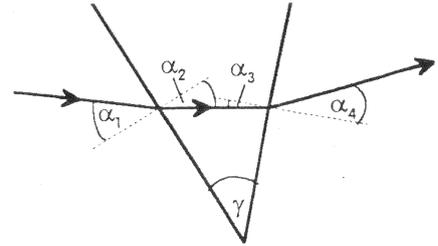
A 4.5 Mit Hilfe eines Gitters soll ein Spektrum erzeugt werden. Dazu trifft „weißes“ Licht ($450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$) senkrecht auf ein Gitter mit der Gitterkonstanten g .

- a) Weshalb sieht das Maximum nullter Ordnung auf dem Schirm weiß aus?
- b) Weshalb findet man die Maxima erster Ordnung für blaues und rotes Licht an verschiedenen Stellen auf dem Schirm?
- c) Untersuchen Sie, ob das Maximum erster Ordnung für blaues oder für rotes Licht auf dem Schirm weiter vom Maximum nullter Ordnung entfernt ist.

A 4.6 Mit Hilfe eines Prismas soll ein Spektrum erzeugt werden. Dazu trifft „weißes“ Licht ($450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$) unter einem Einfallswinkel α_1 auf ein Glasprisma (mit dem Keilwinkel γ). Für blaues Licht ist die Brechungszahl für den Übergang Luft - Glas etwas größer als für rotes Licht.

Untersuchen Sie mit Hilfe des Brechungsgesetzes, welches Licht (blaues oder rotes) im ganzen durch das Prisma stärker aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt wird.
(Für welches Licht ist also der Winkel α_4 größer?)

Hilfe: $\alpha_3 = \gamma - \alpha_2$



A 4.7 Mit Hilfe eines Gitters soll ein Spektrum erzeugt werden. Dazu trifft „weißes“ Licht ($450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$) senkrecht auf ein Gitter mit 150 Strichen pro Millimeter.

Bestimmen Sie die Breite des Spektrums erster Ordnung, das sich auf einem 4 m entfernten Schirm zeigt.

A 4.8 Mit Hilfe eines Prismas soll ein Spektrum erzeugt werden. Dazu trifft „weißes“ Licht ($450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$) unter einem Einfallswinkel $\alpha_1 = 30^\circ$ auf ein Glasprisma (mit dem Keilwinkel $\gamma = 45^\circ$). Die Brechungsanzahl für den Übergang Luft - Glas beträgt für diese Glassorte

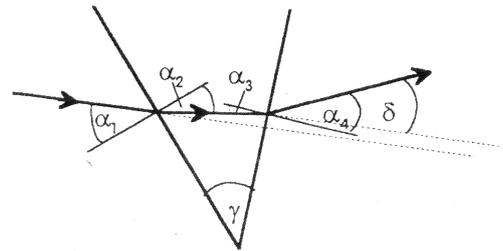
- für Licht mit der Wellenlänge 450 nm: $n_{\text{blau}} = 1,63$,
- für Licht mit der Wellenlänge 750 nm: $n_{\text{rot}} = 1,60$.

Bestimmen Sie die Breite des Prismenspektrums, das sich auf einem 4 m entfernten Schirm zeigt.

Hilfen:

$$\alpha_3 = \gamma - \alpha_2$$

Der gesamte Ablenkungswinkel δ gegenüber der ursprünglichen Richtung beträgt: $\delta = \alpha_4 + \alpha_1 - \gamma$.



A 4.9 Bei einem Gitterversuch ($g = \frac{1}{570} \text{ mm}$) wurden folgende Meßwerte ermittelt:

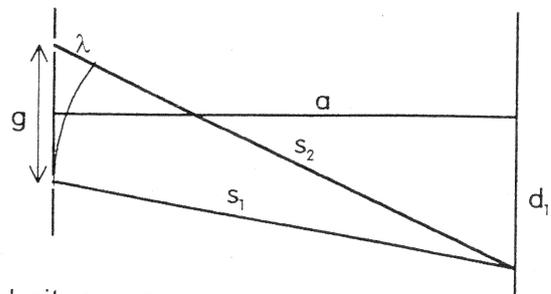
$a = 1,00 \text{ m}$; $d_1 = 38,6 \text{ cm}$. Es soll die Wellenlänge des verwendeten Lichtes berechnet werden.

Dazu hatten wir früher häufig das folgende Verfahren angewendet: Wir haben die Strecken s_2 und s_1 und deren Differenz Δs , den Gangunterschied, berechnet:

$$s_2 = \sqrt{a^2 + \left(d_1 + \frac{1}{2} \cdot g\right)^2}$$

$$s_1 = \sqrt{a^2 + \left(d_1 - \frac{1}{2} \cdot g\right)^2}$$

$$\gamma = \Delta s = s_2 - s_1$$



Wenn man hier so vorgehen will,

erhält man im Rahmen der Rechengenauigkeit: $s_2 = s_1$

(s_2 und s_1 unterscheiden sich ja nur um eine Wellenlänge).

a) Berechnen Sie $s = s_2 = s_1$.

Aus den beiden oben angegebenen Gleichungen kann man folgern:

$$s_2^2 - s_1^2 = 2 \cdot d_1 \cdot g$$

$$(s_2 - s_1) \cdot (s_2 + s_1) = 2 \cdot d_1 \cdot g$$

$$\lambda = \frac{d_1 \cdot g}{s}$$

$$\lambda = \frac{d_1 \cdot g}{\sqrt{a^2 + d_1^2}}$$

- b) Begründen Sie die einzelnen Schritte.
- c) Berechnen Sie nach der letzten Gleichung die Wellenlänge des verwendeten Lichtes.
- d) Berechnen Sie auf einem anderen Weg die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und vergleichen Sie die Ergebnisse.

A 4.10 Auf ein Gitter (Gitterkonstante g) fällt paralleles monochromatisches Licht. Auf einem Schirm im Abstand a hinter dem Gitter ist ein Interferenzstreifensystem zu beobachten.

- a) Warum verringert sich der Streifenabstand auf dem Schirm, wenn zwischen Gitter und Schirm ein Plexiglasstab der Länge a gehalten wird, wenn also (für das Licht) der gesamte Raum zwischen Gitter und Schirm mit Plexiglas ausgefüllt ist?
- b) Überlegen Sie, wie man mit Hilfe dieses Versuches die Geschwindigkeit des Lichtes in Plexiglas bestimmen kann, wenn die Geschwindigkeit des Lichtes in Luft bekannt ist!

Lösungen

zu A 4.1 Es soll $d_1 \geq 3 \text{ mm}$ sein.

$$\text{Bei } a = 4 \text{ m mu\ss dann gelten: } \tan \alpha \geq 7,5 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \alpha \geq 0,043^\circ$$

$$\text{und } \sin \alpha \geq 7,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Mit } \lambda = 600 \text{ nm folgt dann: } g \leq 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \frac{1}{1250} \text{ m.}$$

Das optische Gitter mu\ss mindestens 13 Spalte pro Zentimeter haben (25 Spalte pro zwei Zentimeter).

zu A 4.2 a) Es ist $\sin \alpha_1 \leq 1$.

Daher mu\ss f\u00fcr die gr\u00f6\sste verwendete Wellenl\u00e4nge (800 nm) gelten:

$$\frac{\lambda_{\text{rot}}}{g} \leq 1. \text{ Aus } g \geq 800 \text{ nm} = 0,0008 \text{ mm folgt:}$$

Es sind h\u00f6chstens 1 250 Striche pro Millimeter.

b) F\u00fcr die gr\u00f6\sste verwendete Wellenl\u00e4nge (800 nm) mu\ss jetzt gelten:

$$\frac{2 \cdot \lambda_{\text{rot}}}{g} \leq 1. \text{ Aus } g \geq 1600 \text{ nm} = 0,0016 \text{ mm folgt:}$$

Es sind h\u00f6chstens 625 Striche pro Millimeter.

Ein optisches Gitter, das mehr Striche pro Millimeter hat als das Rowlandgitter, w\u00e4re f\u00fcr Interferenzversuche kaum sinnvoll.

zu A 4.3 Aus d und a ergibt sich der Beugungswinkel:

$$\tan \alpha_1 = 0,386 \text{ und damit } \alpha_1 = 21,1^\circ$$

$$\tan \alpha_2 = 1,054 \text{ und damit } \alpha_2 = 46,5^\circ$$

$$\text{Dann folgt: } \sin \alpha_1 = 0,360 \qquad \sin \alpha_2 = 0,725$$

$$g = \frac{632,8 \text{ nm}}{0,360} \qquad g = \frac{2 \cdot 632,8 \text{ nm}}{0,725}$$

$$= 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ m} \qquad = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Das Gitter hatte also

568 Striche pro Millimeter bzw. 571 Striche pro Millimeter.

Die Messungen wurden mit Hilfe eines Rowlandgitters durchgef\u00fchrt. Etwas M\u00fche mu\ss auf die Justierung des Schirmes (Leinwand) verwendet werden. Er mu\ss senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des ungebeugten Laserlichtes stehen. Hier wurde darauf geachtet, da\ss $d_{1,\text{rechts}} = d_{1,\text{links}}$ gilt.

zu A 4.4 a) Mit der Gaze verwenden wir ein Lochgitter (besser: zwei gekreuzte Strichgitter) statt des sonst \u00fcblichen einen Strichgitters. Das Laserlicht erzeugt in zwei Richtungen durch Beugung und Interferenz Punktereihen, die bei \u00dcberlagerung das Punktemuster ergeben.

Das Interferenzmuster ist kein direktes Abbild des beugenden Objektes, auch wenn es Aussagen \u00fcber dieses Objekt zul\u00e4\ssst. W\u00fcrde man mit Hilfe von Gl\u00fchlicht, Beleuchtungsspalt und Kreuzgitter Interferenzen untersuchen, so w\u00fcrde man auf dem Schirm Linien finden (Spaltbilder an verschiedenen Stellen).

Zu A 4.4 b) Die Aufgabe besteht jetzt darin, für zwei Richtungen (senkrecht und waagrecht) die Gitterkonstante zu bestimmen. Aus d_2 und a ergibt sich der Beugungswinkel:

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{2,s} &= \frac{d_{2,s}}{a} & \tan \alpha_{2,w} &= \frac{d_{2,w}}{a} \\ &= 0,0104 & &= 0,00963 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dann folgt: } \sin \alpha_{2,s} &= 0,0104 & \sin \alpha_{2,w} &= 0,00963 \\ g_s &= \frac{2 \cdot 632,8 \text{ nm}}{0,0104} & g_w &= \frac{2 \cdot 632,8 \text{ nm}}{0,00963} \\ &= 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ m} & &= 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

Die Gaze hat also pro Zentimeter
senkrecht 82 Fäden, waagrecht 76 Fäden.

Eine interessante Zusatzaufgabe wäre es jetzt, die Gaze mit Hilfe eines (Meß-) Mikroskops zu untersuchen.

zu A 4.5 a) Das Maximum nullter Ordnung liegt für alle Wellenlängen an der gleichen Stelle, es sieht also weiß aus.

b) Die Lage des Maximums erster Ordnung hängt von der Wellenlänge ab. Für unterschiedliche Wellenlängen ergeben sich verschiedene Beugungswinkel und damit unterschiedliche Entfernungen zwischen den Maxima nullter und erster Ordnung.

c) Aus $\lambda_{\text{rot}} > \lambda_{\text{blau}}$ folgt $d_{1,\text{rot}} > d_{1,\text{blau}}$.

zu A 4.6 Aus $n_{\text{rot}} < n_{\text{blau}}$ und $\alpha_{1,\text{rot}} = \alpha_{1,\text{blau}}$ folgt:

$$\alpha_{2,\text{rot}} > \alpha_{2,\text{blau}} \text{ wegen } \sin \alpha_2 = \frac{\sin \alpha_1}{n}$$

Weiter gilt: $\alpha_{3,\text{rot}} < \alpha_{3,\text{blau}}$ wegen $\alpha_3 = \gamma - \alpha_2$

und: $\alpha_{4,\text{rot}} < \alpha_{4,\text{blau}}$ wegen $\sin \alpha_4 = n \cdot \sin \alpha_3$

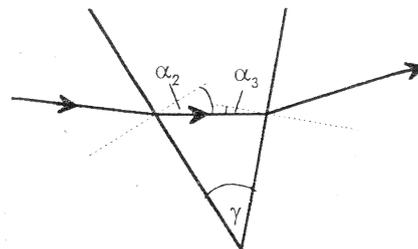
Begründung für die Gleichung, die als Hilfe gegeben war:

Es ist:

$$\gamma + (90^\circ - \alpha_2) + (90^\circ - \alpha_3) = 180^\circ$$

$$\gamma - \alpha_2 - \alpha_3 = 0^\circ$$

$$\text{also: } \alpha_3 = \gamma - \alpha_2.$$



zu A 4.7 Aus $\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{g}$ und $g = \frac{1}{150} \text{ mm} = 0,00667 \text{ mm}$ folgt

für $\lambda_{\text{rot}} = 750 \text{ nm}$:

$$\alpha_{1,\text{rot}} = 6,46^\circ$$

für $\lambda_{\text{blau}} = 450 \text{ nm}$:

$$\alpha_{1,\text{blau}} = 3,87^\circ$$

Nach $d_1 = a \cdot \tan \alpha_1$ ergibt sich:

$$d_{1,\text{rot}} = 45,3 \text{ cm}$$

$$d_{1,\text{blau}} = 27,1 \text{ cm}$$

Das Spektrum erster Ordnung ist also $b = 45,3 \text{ cm} - 27,1 \text{ cm} = 18,2 \text{ cm}$ breit.

zu A 4.8 Die angegebenen Winkel lassen sich nacheinander berechnen:

$$\text{Aus } n_{\text{rot}} = 1,60,$$

$$n_{\text{blau}} = 1,63$$

$$\text{und } \alpha_{1,\text{rot}} = 30^\circ,$$

$$\alpha_{1,\text{blau}} = 30^\circ,$$

folgt mit Hilfe des Brechungsgesetzes:

$$\alpha_{2,\text{rot}} = 18,21^\circ,$$

$$\alpha_{2,\text{blau}} = 17,86^\circ.$$

Nach der angegebenen Gleichung $\alpha_3 = \gamma - \alpha_2$ ergibt sich:

$$\alpha_{3,\text{rot}} = 26,79^\circ,$$

$$\alpha_{3,\text{blau}} = 27,14^\circ.$$

Daraus folgt wieder mit Hilfe des Brechungsgesetzes:

$$\alpha_{4,\text{rot}} = 46,15^\circ,$$

$$\alpha_{4,\text{blau}} = 48,03^\circ.$$

Der Ablenkungswinkel δ lässt sich schließlich nach der angegebenen Gleichung berechnen: $\delta = \alpha_4 + \alpha_1 - \gamma$

$$\delta_{4,\text{rot}} = 31,15^\circ,$$

$$\delta_{4,\text{blau}} = 33,03^\circ.$$

Wie beim Gitterversuch können wir jetzt die Abstände (zwischen gebrochenem und nicht gebrochenem Lichtstrahl) auf dem Schirm nach der Gleichung $d = a \cdot \tan \delta$ bestimmen:

$$d_{\text{rot}} = 2,42 \text{ m}$$

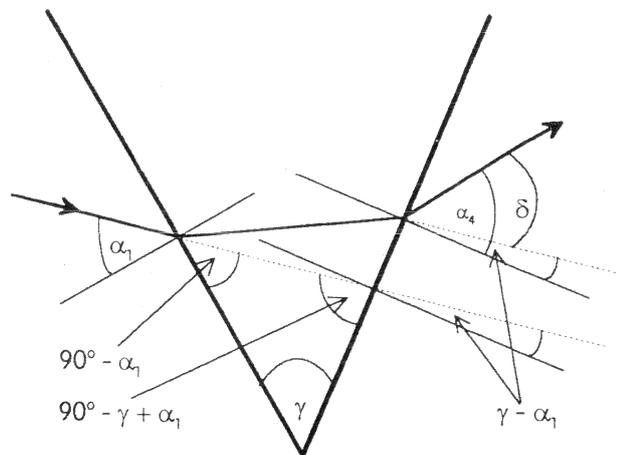
$$d_{\text{blau}} = 2,60 \text{ m}.$$

Das Spektrum ist also $b = 2,60 \text{ m} - 2,42 \text{ m} = 18 \text{ cm}$ breit.

Die Gleichung

$$\delta = \alpha_4 + \alpha_1 - \gamma$$

lässt sich aus der nebenstehenden Skizze ablesen:



zu A 4.9 a) Mit $a = 1,00 \text{ m}$; $d_1 = 38,6 \text{ cm}$ und $g = 1,754 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ ergibt sich:

$$s_2 = \sqrt{a^2 + (d_1 + \frac{1}{2} \cdot g)^2}$$

$$s_1 = \sqrt{a^2 + (d_1 - \frac{1}{2} \cdot g)^2}$$

$$= \sqrt{1\text{m}^2 + 0,1490\text{m}^2}$$

$$= \sqrt{1\text{m}^2 + 0,1490\text{m}^2}$$

$$= 1,072 \text{ m}$$

$$= 1,072 \text{ m}$$

Man erhält also im Rahmen der Rechengenauigkeit:

$$s = s_2 = s_1 = 1,072 \text{ m}.$$

zu A 4.9 b) Aus den gegebenen Gleichungen erhält man durch Quadrieren und Subtrahieren:

$$s_2^2 - s_1^2 = 2 \cdot d_1 \cdot g$$

Nach dem 3. binomischen Satz folgt:

$$(s_2 - s_1) \cdot (s_2 + s_1) = 2 \cdot d_1 \cdot g$$

Nach der obigen Rechnung kann die Summe $s_2 + s_1$ im Rahmen der Rechengenauigkeit gleich $2s$ gesetzt werden.

Für die Differenz gilt: $s_2 - s_1 = \lambda$

(Interferenzbedingung für das Maximum erster Ordnung; $s_2 - s_1$ darf als Faktor natürlich nicht gleich null gesetzt werden.)

$$2 \cdot s \cdot \lambda = 2 \cdot d_1 \cdot g$$

Da die Gitterkonstante gegenüber a und d_1 vernachlässigt werden kann, läßt sich s nach dem Satz des Pythagoras berechnen:

$$\lambda = \frac{d_1 \cdot g}{s}$$

$$\lambda = \frac{d_1 \cdot g}{\sqrt{a^2 + d_1^2}}$$

c) Für die Wellenlänge ergibt sich nach dieser Gleichung: $\lambda = 632 \text{ nm}$.

d) Der übliche Weg zur Berechnung der Wellenlänge besteht darin, daß zunächst mit a und d_1 der Beugungswinkel α_1 bestimmt, dann nach

$\lambda = g \cdot \sin \alpha_1$ die Wellenlänge berechnet wird:

$$\tan \alpha_1 = 0,386$$

$$\alpha_1 = 21,1^\circ$$

$$\sin \alpha_1 = 0,360$$

$$\lambda = \frac{0,360 \text{ mm}}{570}$$

$$= 6,32 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$= 632 \text{ nm}$$

Daß die Ergebnisse bei c) und d) übereinstimmen, ist nicht verwunderlich:

Bei d) haben wir mit Hilfe des Wertes für $\tan \alpha_1$ den Beugungswinkel und dann den Wert für $\sin \alpha_1$ berechnet.

Bei c) wurde aus d_1 und s gleich der Wert für $\sin \alpha_1$ bestimmt.

Zu A 4.10 a) Wenn man annimmt, daß sich das Gitter unmittelbar an der Stirnfläche des Plexiglasstabes befindet, ergeben sich die Beugungswinkel aus der Wellenlänge in Plexiglas und der Gitterkonstanten. Sie werden bei kleinerer Wellenlänge kleiner. Damit verkleinert sich auch der Streifenabstand des Interferenzmusters.

Befindet sich zwischen Gitter und Plexiglas ein kleiner Luftspalt, dann handelt es sich zunächst um Beugung in Luft. Der Streifenabstand verkleinert sich aufgrund des Brechungsgesetzes. Wenn man die Breite des Luftspaltes im Vergleich zur Länge des Plexiglasstabes vernachlässigt, erhält man bei einer Rechnung wieder den gleichen Streifenabstand.

b) Der Versuch gestattet es, die Wellenlängen des verwendeten Lichts in Luft und in Plexiglas zu bestimmen. Das Verhältnis der Wellenlängen ist gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten.

5. Überlagerung von Wellen: Stehende Wellen

5.1 Inhalte

- Erzeugung stehender Wellen
- Vergleich von stehenden und fortschreitenden Wellen
- Wellenlängen-Bestimmung
- stehende Wellen bei Musikinstrumenten

Bemerkungen:

Das Phänomen der stehenden Welle wird auf ein-, zwei- und dreidimensionalen Wellenträgern beobachtet und untersucht. Unterschiede zwischen stehenden und fortschreitenden Wellen sollen herausgearbeitet werden. Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Abschnitten betrachteten Interferenzerscheinungen wird hier die Interferenz zweier Wellen betrachtet, die einander auf demselben Träger entgegenlaufen.

Stehende Wellen bieten eine weitere, in einigen Fällen sogar eine besonders einfache Methode zur Wellenlängenbestimmung. Hierbei können wiederum physikhistorische Aspekte in den Unterrichtsgang einbezogen werden.

5.2 Unterrichtsgang

- 23. Stunde: das Phänomen der stehenden Welle, Beschreibung
- 24. Stunde: Erklärung für das Entstehen der stehenden Welle
- 25. Stunde: Wellenlängen-Bestimmung
- 26. Stunde: Anwendungen der stehenden Welle

5.3 Hinweise zu den Stunden

23. Stunde:

Mit einem der Versuche D 5.1 bis D 5.4 wird das Phänomen der stehenden Welle veranschaulicht. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Interferenzerscheinungen wird jetzt die Interferenz von zwei Wellen mit gleicher Amplitude und Wellenlänge betrachtet, die einander auf demselben Träger entgegenlaufen. Die Schülerinnen und Schüler werden Schwierigkeiten haben, die zurücklaufende Welle überhaupt zu erkennen. Daher wird es zweckmäßig sein, die Reflexion einer Störung bei dem verwendeten Versuchsaufbau zu demonstrieren. Auf die Unterschiede der Reflexion am festen und am losen Ende muß hier nicht explizit eingegangen werden.

Als besondere Merkmale einer stehenden Welle werden die Bewegungsbäuche und die Bewegungsknoten benannt. Die charakteristischen Merkmale der stehenden Welle werden herausgearbeitet und mit den Eigenschaften der fortschreitenden Welle vergli-

chen. Zur Veranschaulichung kann dabei das Wellen-Modell projiziert werden (Leybold, Katalog Nr. 401 14).

Die Tabelle auf der folgenden Seite soll zur Orientierung dienen. Es müssen nicht alle Unterscheidungsmerkmale erarbeitet werden. Die Tabelle kann am Ende der Stunde verteilt werden. (Die größere Schrift wurde gewählt, falls die Tabelle für den Schreibprojektor auf Folie kopiert werden soll.)

Die Hausaufgabe könnte darin bestehen, bestimmte Merkmale zu erläutern.

24. Stunde:

Die Ergebnisse der letzten Stunde werden wiederholt: Eigenschaften der stehenden Welle, Vergleich mit der fortschreitenden Welle.

Es bietet sich an, im Zusammenhang mit dieser Wiederholung fortschreitende und stehende Oberflächenwellen in der Wellenwanne zu demonstrieren. Die Schülerinnen und Schüler übertragen die Erkenntnisse der vergangenen Stunde von ein- auf zweidimensionale Wellenträger. Bei fortschreitenden und stehenden Wasserwellen läßt sich die Wellenlänge abschätzen. Es wird deutlich, daß die Wellenlänge leichter bei stehenden Wellen bestimmt werden kann. Dieser Gedanke wird in der folgenden Stunde erneut aufgegriffen.

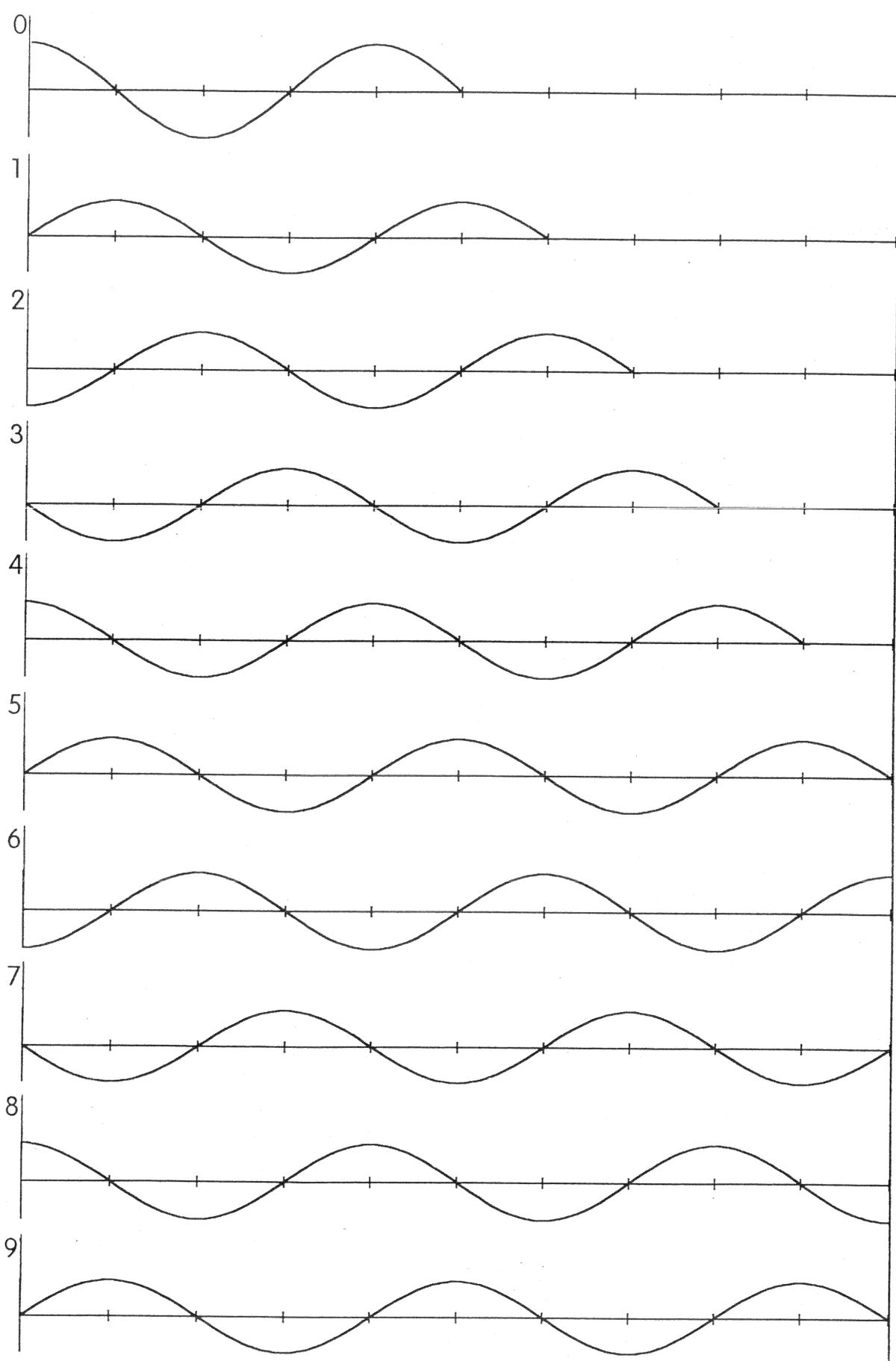
Das Schwergewicht in dieser Stunde liegt darauf, die Entstehung der stehenden Welle zu erklären. Diese Überlegungen sind qualitativ schon vorbereitet. Zur Herstellung von drei Folien für den Schreibprojektor liegen drei Blätter bei, die je zehn Momentaufnahmen von zwei einander entgegenlaufenden Wellen und von deren Überlagerung zeigen.

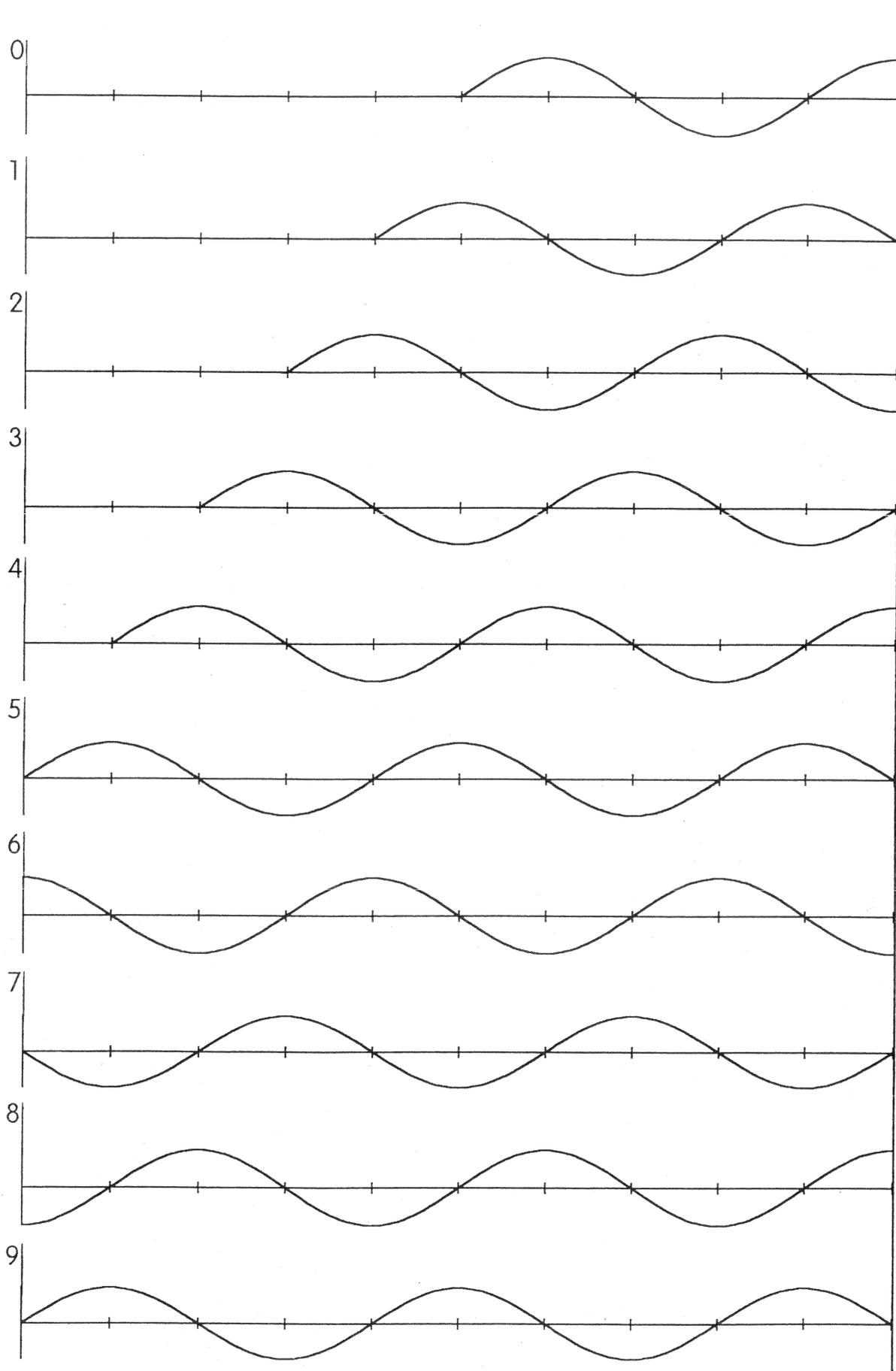
Die Momentaufnahmen dieser Wellen sollten auf diesen drei Folien mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet werden. Die Konstruktion der stehenden Welle muß ausführlich für die einzelnen Momentaufnahmen besprochen werden (Hausaufgabe: A 5.1).

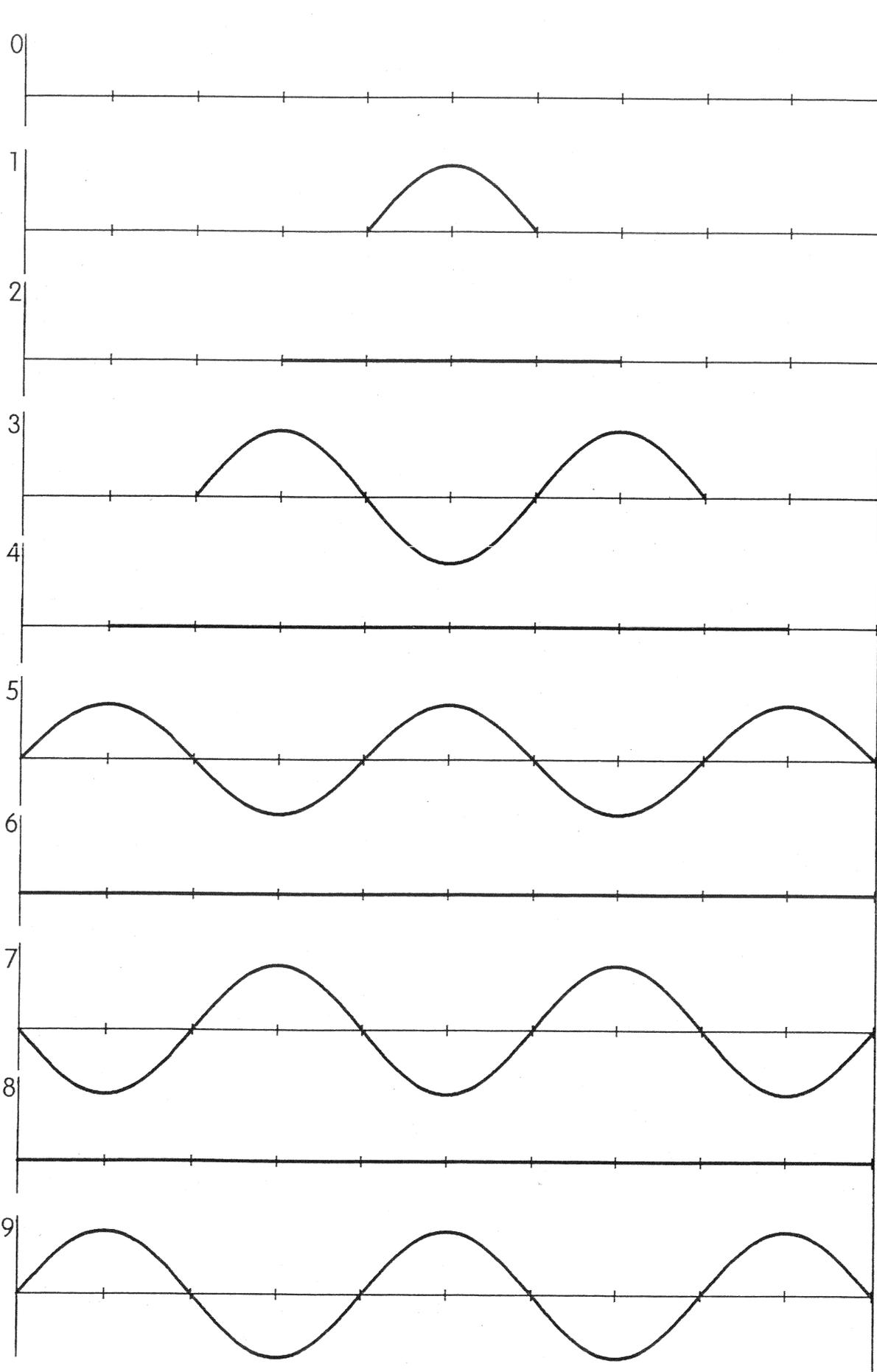
Bei der fertigen Folie mit den zehn Momentaufnahmen der stehenden Welle können die seitlichen Bereiche so abgedeckt werden, daß z.B. nur der Bereich zwischen zwei Knoten zu sehen ist.

Vergleich: fortschreitende Welle - stehende Welle

Merkmal	fortschreitende Welle	stehende Welle
Verschiebung in s_x -Richtung	Verschiebung mit der Geschwindigkeit c in s_x -Richtung	keine Verschiebung in s_x -Richtung
Wellenlänge	Zwei benachbarte Wellenberge haben den Abstand λ . Zwei benachbarte Wellentäler haben den Abstand λ .	Zwei benachbarte Bäuche haben den Abstand $0,5 \cdot \lambda$. Zwei benachbarte Knoten haben den Abstand $0,5 \cdot \lambda$.
Frequenz	Alle Oszillatoren schwingen mit der gleichen Frequenz f .	Die Oszillatoren bei den Knoten sind ständig in Ruhe. Alle übrigen Oszillatoren schwingen mit der gleichen Frequenz f .
Amplitude	Alle Oszillatoren führen Schwingungen mit gleicher Amplitude aus.	Alle Oszillatoren zwischen einem Knoten und einem Bauch führen Schwingungen mit unterschiedlicher Amplitude aus.
Zeitpunkt des Nulldurchgangs	Die Oszillatoren erfahren nacheinander einen Nulldurchgang. Jeder einzelne Oszillator geht jeweils nach der Zeit $0,5 \cdot T$ durch die Nullage.	Alle Oszillatoren erfahren gleichzeitig einen Nulldurchgang. Jeder einzelne Oszillator geht jeweils nach der Zeit $0,5 \cdot T$ durch die Nullage.
Zeitpunkt der maximalen Auslenkung	Die Oszillatoren erreichen nacheinander dieselbe maximale Auslenkung. Jeder einzelne Oszillator erreicht jeweils nach der Zeit $0,5 \cdot T$ einen seiner beiden Umkehrpunkte.	Alle Oszillatoren erreichen gleichzeitig ihre maximale Auslenkung. Jeder einzelne Oszillator erreicht jeweils nach der Zeit $0,5 \cdot T$ einen seiner beiden Umkehrpunkte.
Phase	Oszillatoren im Abstand $n \cdot \lambda$ schwingen gleichphasig. Oszillatoren im Abstand $(n + 0,5) \cdot \lambda$ schwingen gegenphasig.	Alle Oszillatoren zwischen zwei Knoten schwingen gleichphasig. Oszillatoren von zwei benachbarten Bäuchen schwingen gegenphasig.







25. Stunde:

In dieser Stunde werden stehende Schall-, bzw. Ultraschallwellen untersucht (vgl. D 5.5 und D 5.6). Die Wellen breiten sich vom Erreger im dreidimensionalen Raum aus, die stehenden Wellen werden aber bei allen aufgeführten Experimenten nur in einer bestimmten Ausbreitungsrichtung demonstriert und betrachtet.

Nach mehreren früher behandelten Methoden zur Bestimmung der Wellenlänge bieten die stehenden Wellen eine weitere, in einigen Fällen sogar eine besonders einfache Methode zur Wellenlängenbestimmung. In einem ausgewählten Experiment wird die Wellenlänge gemessen. Bei bekannter Frequenz läßt sich dann wieder die Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnen.

Bemerkungen:

- Bei der Beschreibung und graphischen Darstellung von stehenden Schallwellen sollte man sich auf die Schnelleverteilung beschränken.
- Auch wenn die Reflexion von Wellen am losen und festen Ende nicht explizit behandelt wurde, so kann doch beim Versuch mit dem Kundtschen Rohr die Ausbildung von stehenden Wellen bei offenem und geschlossenem Ende demonstriert werden. Diese Unterschiede werden vielleicht bei der Behandlung von Blasinstrumenten in der nächsten Stunde wieder aufgegriffen.
- Auch dieses Thema bietet Gelegenheit, auf physikhistorische Aspekte einzugehen (siehe unten). Auf zwei Punkte sollte man vielleicht besonders hinweisen:
 - 1) Auch Kundt bekennt sich dazu, daß er die kleinen Querrippen nicht erklären kann (siehe S. 104, 3. Absatz).
 - 2) Auf die Untersuchungen von Otto Wiener (siehe S. 105) sollte hingewiesen werden, um auch in diesem Abschnitt wieder die Lichtwellen anzusprechen. Die angegebene Arbeit von Wiener ist in weiten Teilen als Grundlage für Referate von Schülerinnen oder Schülern geeignet.

Bemerkungen zur Geschichte:

„Seit der schönen Entdeckung Chladnis, durch aufgestreuten Sand ... die Schwingungsformen tönender Körper dem Auge sichtbar zu machen, ist dies einfache leichte Verfahren in den Händen verschiedener Physiker zu einem Hilfsmittel geworden, welches zu bedeutenden Aufschlüssen in der Akustik geführt hat.... und bekanntlich ist ein Theil dessen, was man durch aufgestreuten Sand beobachten kann, theoretisch noch durchaus nicht zu dem erwünschten Abschluß gekommen.... Staubfiguren durch tönende Luftmassen, also etwa im Inneren einer Orgelpfeife, sind bisher nicht beobachtet worden.“ Mit diesen Worten beginnt **August Kundt** (1839, Schwerin, - 1894, Israelsdorf bei Lübeck)

seine erste Arbeit *„Über eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen“* (Poggendorffs Annalen Bd. CXXVII, 497 - 523, 1866). Kundt bezieht sich ausdrücklich auf Chladnis Klangfigurenverfahren, bei welchem immer transversale Stöße eines festen tönenden Körpers aufgezeichnet werden. **Ernst Chladni** (1756, Wittenberg, - 1827, Breslau) soll durch die Entdeckung der Lichtenberg-schen Figuren (Staubfiguren elektrischer Büschelentladungen auf Platten, 1777) zur Darstellung der Klangfiguren angeregt worden sein (**Georg Christoph Lichtenberg**, 1742, Oberramstadt, - 1799, Göttingen).

Chladni galt als der im deutschen Sprachraum damals tüchtigste Vertreter experimenteller Physik. Er stellte die Lehre vom Schall auf eine neue Grundlage.

In seiner Schrift „*Entdeckungen über die Theorie des Klanges*“ (1787, Leipzig) beschrieb er erstmals die nach ihm benannten Klangfiguren. Namhafte Naturforscher in England (Thomas Young, Charles Wheatstone, Michael Faraday) und in Frankreich (Félix Savart, Jean Biot, Siméon Poisson) experimentierten mit den Chladnischen Figuren. Seinen Lebensunterhalt konnte Chladni allein durch seinen guten Ruf und die Anerkennung seiner Entdeckung nicht sichern; er entschloß sich, neue Musikinstrumente (Euphon, Clavizylinder) zu konstruieren, die er als Virtuose auf Vortragsreisen vorzustellen verstand. Nach einem Vortrag vor der kaiserlichen Familie Napoleons erhielt Chladni 1809 in Paris in Anerkennung seiner wissenschaftlichen Leistung und als Entgelt für seine Ausarbeitung des „*Traité d'Acoustique*“ von Napoleon 600 Goldfranken.

Über die bei den Staubfiguren auftretenden Querrippen schreibt Kundt in seiner ersten Arbeit von 1866: „*Was die Entstehung dieser Querrippen überhaupt angeht, so enthalte ich mich darüber an dieser Stelle jedes Urtheils; bisherige Erklärungsversuche sind mir durch andere, bis jetzt aber noch nicht zum Abschluß gekommene Versuche, durchaus unsicher geworden, und ich möchte daher lieber überhaupt keine Erklärung versuchen ...*“ Die Abstände der Querrippen haben mit der stehenden Welle direkt nichts zu tun; die kleinen Querrippen sollen sich durch Wirbelbildung infolge der starken Luftschwingungen innerhalb des Rohres ausbilden (vgl. z.B.: Dorn-Bader „Physik, Oberstufe, Band MS“).

Kundt bewies schon als Knabe Ehrgeiz und Unternehmungsgeist, jene für den späteren Experimentalphysiker unermeßlich wichtigen Eigenschaften. Er richtete sich im Haus seiner Eltern ein eigenes Labor ein, das von den Hausangestellten „Die Hexenküche von August, dem Zauberer“ genannt wurde. Kundt stand zu Beginn seiner wis-

senschaftlichen Laufbahn noch ganz in der Tradition der „Magnus-Schule“. **Heinrich Gustav Magnus** (1802 - 1870, Berlin) prägte die Ansicht, daß der Experimentalphysiker - losgelöst von den Entwicklungen, Ideen und Hypothesen der theoretischen Physik und die Spekulationen über die Ursachen und die Natur physikalischer Prozesse verachtend - den Bau von Meßapparaten und die Durchführung von Messungen zum ausschließlichen und zentralen Anliegen seines Tuns zu erheben habe. Kundt überwand diese Vorstellung und zeigte der Experimentalphysik einen neuen Weg, indem er sie in den Dienst des Theoriengebäudes stellte; sie sollte durch solide experimentelle Evidenz theoretische Ansätze sichern oder widerlegen helfen, oder sie sollte die Theoretiker mit neuen Phänomenen versorgen, die einer Erklärung bedürfen. Der Weg zu diesem neuen Verständnis von Experimentalphysik ist eng mit der weiteren Entwicklung der Staubfigurenmethode verbunden. Über die bloße Visualisierung stehender Schallwellen hinaus wandte Kundt seine Methode bald erfolgreich an, um die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen, Dämpfen und festen Körpern zu bestimmen. Aber wozu war die Methode noch gut? Kundt selbst schreibt: „*Der eigentliche Zweck meiner Experimente bestand darin, die neue Methode ... zu benutzen, um Kenntnisse über die spezifische Wärme von Gasen und Dämpfen oder zumindest Kenntnisse über das Verhältnis* $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ *zu erhalten ...*“ κ bestimmt bekannt-

lich - wie Laplace und Biot Anfang des 19. Jahrhunderts zeigten - neben dem Gasdruck und der Gasdichte die Schallgeschwindigkeit in Gasen ($c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}}$).

Zehn Jahre nach seinen ersten Messungen mit Staubfiguren fand Kundt zusammen mit **Emil Warburg** (1846, Altona, - 1931, Grunau; Vater des Biochemikers und Nobelpreisträgers für Medizin 1931, Otto Heinrich Warburg) den Schlüssel zum Erfolg. Sie bestimmten das Verhältnis der Wellenlängen in Luft und Quecksilberdampf und fan-

den für $\frac{\kappa_{\text{Hg}}}{\kappa_{\text{Luft}}}$ den Wert 1,186; Kundts damaliger Assistent **Wilhelm Conrad Röntgen** (1845, Lennep, - 1923, München), dem Kundt trotz fehlender Reifeprüfung die Habilitation in Straßburg ermöglichte, hatte zuvor für κ_{Luft} den Wert 1,405 gefunden. Triumphierend stellten die drei Experimentatoren für κ_{Hg} einen Wert von $1,405 \cdot 1,186 = 1,666$ fest, der auf 1 ‰ genau mit dem von **Rudolf Clausius** (1822, Köslin, - 1888, Bonn) übereinstimmte. Kundt hatte einen entscheidenden experimentellen Beitrag für die Gültigkeit der kinetischen Gastheorie geliefert und damit einen wichtigen Anstoß für den Fortgang der Debatte über die Natur der Moleküle geleistet. Als treuer Magnus-Schüler hätte er sich weigern müssen, über derartige Hirngespinnste wie Moleküle und Atome überhaupt nachzudenken.

Als Ergänzung sollte den Schülern mitgeteilt werden, daß es **Otto Wiener** (1862, Karlsruhe, - 1927, Leipzig) im Jahr 1889 gelang, stehende Lichtwellen zu erzeugen und mit Hilfe dieses Versuches u.a. die Wellenlänge des benutzten einfarbigen Lichtes zu bestimmen. (Vgl. z.B.: Dorn-Bader „Physik, Oberstufe, Band O“. Viel anregender - da authentisch - liest sich die Originalarbeit „*Stehende Lichtwellen und die Schwingungsrichtung polarisierten Lichtes*“ in *Annalen der Physik und Chemie* 40 (1890), S. 203 - 243.

Angeregt durch Arbeiten von **Heinrich Hertz** (1857, Hamburg, - 1894, Bonn) über die Phasenänderung bei Reflexion elektromagnetischer Wellen hoffte Wiener im Rahmen seiner Dissertation bei A. Kundt die optische Streitfrage zu klären, ob auch für Licht bei senkrechter Reflexion an einem optisch dichteren Medium eine Phasenänderung erfolgt. Er wollte diese Frage mittels stehender Lichtwellen durch Bestimmung der Lage der Schwingungsbäuche und -knoten bezüglich der spiegelnden Fläche klären.

Zum Nachweis stehender Lichtwellen konnten die gebräuchlichen Gelatineplatten wegen ihrer Undurchsichtigkeit und Dicke

nicht in Frage kommen, denn „eine Untersuchung stehender Lichtwellen ist nur dann denkbar, wenn man ihre Wirkung auf einer Strecke, die einen kleinen Bruchteil der Wellenlänge beträgt, gesondert erhalten kann.“ Wiener entwickelte eine durchsichtige lichtempfindliche Schicht aus Chlorsilbercollodium, die er auf einen Glasträger auftrug und deren Dicke ohne zu große Beeinträchtigung der Lichtempfindlichkeit auf $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{40}$ der Wellenlänge des Na-Lichtes gebracht werden konnte (15 nm bis 30 nm!). Dieses lichtempfindliche Häutchen war zur Vermeidung störender Reflexionen an den Grenzflächen zwischen optisch mit ihm nahezu homogenen Körpern eingebettet.

Es befand sich in geringer Entfernung vor einem (Silber-) Metallspiegel, gegen diesen schwach geneigt. Zur Beleuchtung benutzte Wiener spektral zerlegtes Licht einer Bogenlampe. Nach einer Belichtungszeit von ein bis zwei Minuten und anschließender Entwicklung des lichtempfindlichen Häutchens zeigte sich ein scharfes Streifenmuster. „Bei dieser Untersuchungs-methode stellt das dünne lichtempfindliche Häutchen gewissermaßen ein durchsichtiges Auge dar, welches gleichzeitig von entgegengesetzten Seiten Lichteindrücke aufnehmen kann. ... Nun ist die Möglichkeit gegeben, die Lichtbewegung an Ort und Stelle nach Amplitude und Phase ... zu untersuchen“, bemerkt Wiener abschließend zu seinem Meisterstück an Experimentierkunst.

Quellen:

Neue Deutsche Biographie
Duncker & Humblot, Berlin, 1957

Dictionary of Scientific Biography
Herausgeber: Charles Coulston Gillispie,
Charles Scribner's Sons, New York, 1971

David Cahan, From Dust Figures to the Kinetic Theory of Gases: August Kundt and the Changing Nature of Experimental Physics in the 1860s and 1870s. *Annals of Science*, 47 (1990), 151-172.

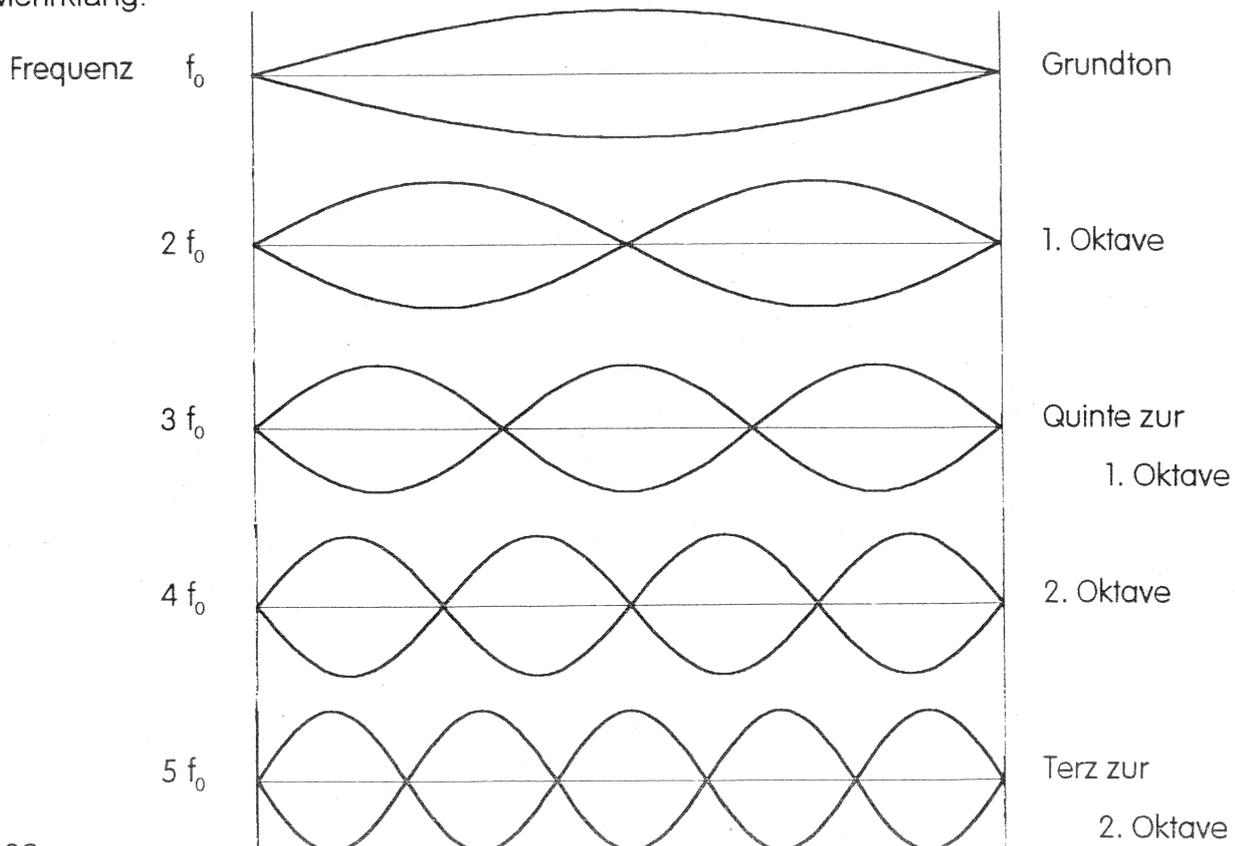
26. Stunde:

In dieser Stunde sollen die erarbeiteten physikalischen Kenntnisse über stehende Wellen auf zwei bekannte Musikinstrumente angewendet werden, auf die Blockflöte und die Gitarre.

Für den Grundton der Blockflöte wird im Versuch D 5.7 die Frequenz gemessen. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit c läßt sich die Wellenlänge berechnen. Dieses Ergebnis und der Meßwert der Rohrlänge legen nahe, daß die Blockflöte etwa eine halbe Wellenlänge lang ist. Im Klassengespräch wird jetzt erarbeitet, wie sich für diesen Grundton eine stehende Welle in dem Blockflötenrohr ausbilden kann und wie das Schwingungsbild dieser stehenden Welle aussehen muß: Es bilden sich an jedem Rohrende ein Schwingungsbauch und in der Rohrmitte ein Knoten aus.

Bei der schwingenden Saite einer Gitarre treten mehrere Eigenschwingungen in unterschiedlichen Intensitäten auf (Grundton und Obertöne). Um die erste Oberschwingung (1. Oktave) hörbar zu machen, muß der Grundton unterdrückt werden. Das geschieht durch vorsichtiges Auflegen der Fingerkuppe auf dem Saitenmittelpunkt (12. Bund, die Saite darf dabei nicht vollständig heruntergedrückt werden; es soll nur die Ausbildung der Grundschiwingung verhindert werden). Analog lassen sich als sogenannte „Flageolettöne“ andere Obertöne hörbar machen (7. Bund, ein Drittel der Saitenlänge, Quinte zur 1. Oktave; 5. Bund, ein Viertel der Saitenlänge, 2. Oktave). Die möglichen Schwingungsbilder der stehenden Wellen ergeben sich zwangsläufig, da an den Enden der Gitarrensaite Knoten entstehen müssen. Da die Wellenlängen sich wie $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \dots$ verhalten, verhalten sich die Frequenzen wie $1 : 2 : 3 : \dots$. Sind die Frequenzverhältnisse der Töne einer (diatonischen) Durtonleiter bekannt ($24 : 27 : 30 : 32 : 36 : 40 : 45 : 48$), dann lassen sich die Obertöne bei der Schwingung der Gitarrensaite identifizieren (vgl. Abbildung).

Es treten also bei den ersten Obertönen der schwingenden Saite neben den Oktavtönen auch die Quinte und die Terz auf. Diese Töne ergeben einen harmonischen Mehrklang.



Bemerkungen:

- In der Mitte der Klavier-Tastatur befindet sich das „eingestrichene C“. Die Töne der entsprechenden (diatonischen) C-Dur-Tonleiter haben die Frequenzen: 264 Hz (c^1), 297 Hz (d^1), 330 Hz (e^1), 352 Hz (f^1), 396 Hz (g^1), 440 Hz (a^1), 495 Hz (h^1), 528 Hz (c^2).
- Der Ton der Blasinstrumente wird von schwingenden Luftsäulen hervorgerufen. Die Anregung zur Schwingung erfolgt bei der Blockflöte durch eine keilförmige Schneide, die direkt hinter der Einblasöffnung (den „Lippen“) angebracht ist. Beiderseits dieser Schneide reißen Luftwirbel abwechselnd mit einer Frequenz ab, die von der Einblasstärke abhängt. Bei passender Frequenz wird die Luftsäule in der Flöte zu stehenden Wellen angeregt, die umgekehrt wieder die Wirbelablösung beeinflussen. Es findet hier eine „Selbststeuerung“ oder „Rückkopplung“ statt.
- Wird eine Gitarrensaite mit Hilfe von zwei Schraubklemmen eingespannt und dann angeschlagen, so ist ihr Ton kaum wahrnehmbar. Daß dieser Ton auf der Gitarre gut hörbar ist, liegt am Resonanzkörper (erzwungene Schwingung für möglichst alle denkbaren Frequenzen; große Oberfläche, um die Schwingung wirkungsvoll an die Luft weiterzugeben).
Unabhängig vom Resonanzkörper beeinflusst die Art des Saitenanschlags die Klangfarbe der Töne entscheidend:

Anschlagen am Saitenende → harter, dünner, kalter Klang;
großer Anteil der Obertöne.

Anschlagen in der Mitte → weicher, warmer Klang;
der Grundton herrscht vor.

Die unterschiedlichen Anteile der Obertöne sind für die Klangunterschiede verantwortlich. Untersuchungen mit Hilfe von Mikrophon und Oszilloskop bieten sich an. Die Flageolettöne haben einen bestimmten Reiz und werden in der Musik bei allen Saiteninstrumenten eingesetzt. Steht eine Geige oder ein Cello zur Verfügung, so lassen sich die angesprochenen Untersuchungen auch an diesen Instrumenten durchführen. Die Flageolettöne sind bei diesen Instrumenten viel überzeugender wahrnehmbar als bei der Gitarre.

- Literaturhinweis zu Gitarre und Blockflöte:
Peter Labudde: „Alltagsphysik“, Dümmler-Buch 4158, S. 67 - 73.

5.4 Demonstrationsversuche

Natürlich lassen sich stehende Wellen gut mit Hilfe einer Wellenmaschine demonstrieren. Es gibt aber eine Reihe von einfacheren und preiswerteren Möglichkeiten.

D 5.1 Stehende Wellen auf einem Seil

Auf einem Gummiseil lassen sich leicht stehende Querwellen mit verschiedenen Wellenlängen erzeugen:

- Die Firma NEVA bietet einen Gleichstrommotor (mit eisenlosem Rotor, 12 V) an (Katalog-Nr.: 5404.00). Wird der Motor mit Wechselspannung betrieben, so ändert er periodisch seine Drehrichtung. Ein auf der Motorachse befestigter Hebel macht Schwingbewegungen und erzeugt (bei geeigneter Frequenz) auf einem Gummiband stehende Wellen.
- Die Firma PHYWE bietet die Nutrolle nach Hoffmann (Katalog-Nr. 02860.00) an. Die Nutrolle wird mit Hilfe eines Experimentiermotors um eine exzentrisch gelagerte Achse gedreht. Ein Bindfaden läuft in der Nut und erzeugt (bei geeigneter Frequenz) auf einem Gummiband stehende Wellen.
- Auf der „Zauberschnur“, die beim Sport eingesetzt wird, lassen sich mit der Hand stehende Querwellen erzeugen.

D 5.2 Stehende Wellen auf einer Feder

- Die Firma PHYWE bietet eine Schraubenfeder an (Länge: 2,5 m; Katalog-Nr. 028 28.00). Auf dieser Feder lassen sich im Freihandversuch eindrucksvoll stehende Querwellen erzeugen. Die Frequenzen sind so klein, daß die Schwingung der einzelnen Federteile gut beobachtet werden kann.
- Mit Hilfe des Gleichstrommotors der Firma NEVA (vgl. D 5.1) lassen sich leicht stehende Längswellen auf einer Schraubenfeder erzeugen. Der Schwinghebel befindet sich am oberen Ende der Feder. Eine Gummischlinge erzeugt eine Gegenkraft zur Federkraft. So wird erreicht, daß der Hebel horizontal steht.
- Stehende Längswellen auf einer weichen Schraubenfeder lassen sich auch mit Hilfe von Experimentiermotor und Exzenter erzeugen.

D 5.3 Stehende Wellen auf einer Holzlatte

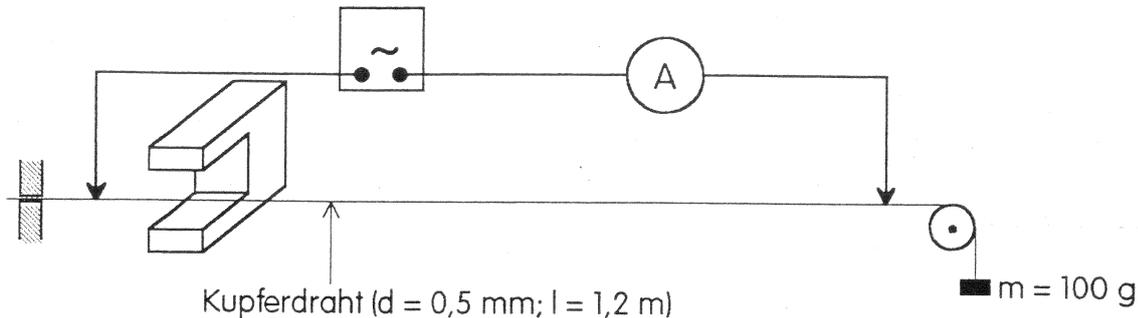
In einem Freihandversuch lassen sich stehende Wellen auf einer Holzlatte (Tapezierleiste) erzeugen.

(Zum Zubehör zum Gleichstrommotor [NEVA, Katalog-Nr. 5403.01, vgl. D 5.1] gehört eine Blattfeder, auf der mit Hilfe des Motors stehende Querwellen erzeugt werden können.)

D 5.4 Stehende Wellen auf einem Kupferdraht

Ein Wechselstrom (I_{eff} : 1 A bis 2 A) fließt durch einen etwa 1,2 m langen Kupferdraht (Durchmesser 0,5 mm). Mit Hilfe eines Hufeisenmagneten können stehende Wellen auf dem Draht erzeugt werden. Die geeigneten Frequenzen sind nicht nur von der Drahtlänge, sondern ganz wesentlich auch von der Drahtspannung abhängig.

Um den Versuch einigermaßen reproduzierbar zu machen, wurde der Draht nur an einer Seite fest eingespannt; der Draht wurde durch die Gewichtskraft eines Gewichtstückes (z.B. $m = 100\text{ g}$) gespannt (vgl. Abbildung).



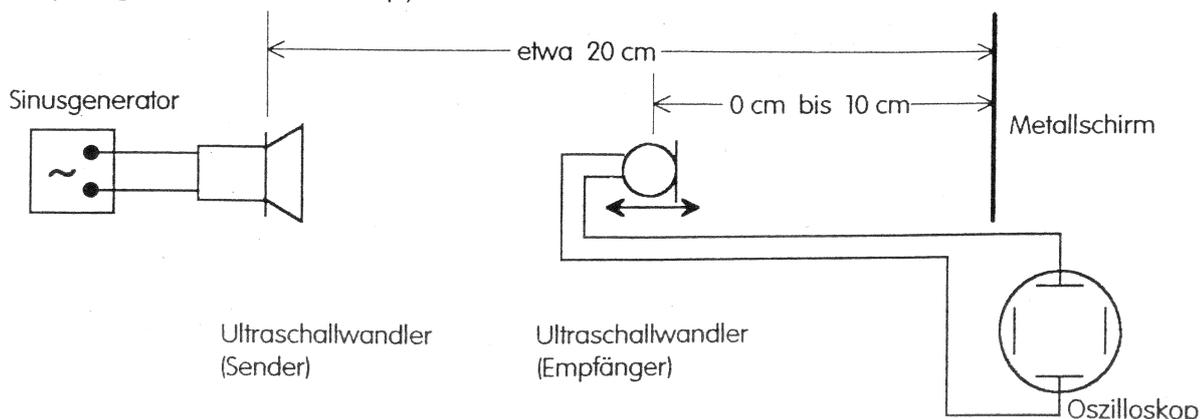
Bei diesem Versuchsaufbau stellte sich bei etwa 10 Hz die Grundschiwingung ein. Bei einer Erhöhung der Frequenz um jeweils 10 Hz (bis 50 Hz) erhöhte sich auch die Anzahl der Bäuche. Die optimale Frequenz mußte jeweils nachgeregelt werden.

D 5.5 Stehende Schallwellen

- Kundtsches Rohr: vgl. Kataloge und Versuchsbeschreibungen der Lehrmittelfirmen. Dieser Versuch ist in den gängigen Schulbüchern beschrieben. Es lassen sich auch die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Metallstab bestimmen.
- Glühdrahröhre: Leybold, Katalog-Nr. 41351. (Schallwellen werden mit der Galtonpfeife erzeugt, Katalog-Nr. 41270). Hier werden die Knoten und Bäuche der stehenden Schallwelle dadurch nachgewiesen, daß ein Glühdraht an verschiedenen Stellen unterschiedlich hell leuchtet.
- Resonanzrohr: Leybold, Katalog-Nr. 41510. Die für den Versuch benötigten Teile lassen sich vielleicht auch in der Chemiesammlung finden: Ein senkrecht stehendes Glasrohr (Durchmesser ca. $2,5\text{ cm}$) ist über einen Schlauch mit einem Ausgleichsgefäß verbunden. Durch Anheben und Absenken des Ausgleichsgefäßes kann die Wasserstandshöhe im Resonanzrohr verändert werden. Bei der Demonstration ist es vorteilhaft, statt der vorgeschlagenen Stimmgabel (1700 Hz) Sinusgenerator ($2\text{ bis }4\text{ kHz}$) und Lautsprecher zur Erzeugung der Schallwellen zu benutzen. Beim Verändern der Wasserstandshöhe findet man im Abstand einer halben Wellenlänge Resonanzstellen.

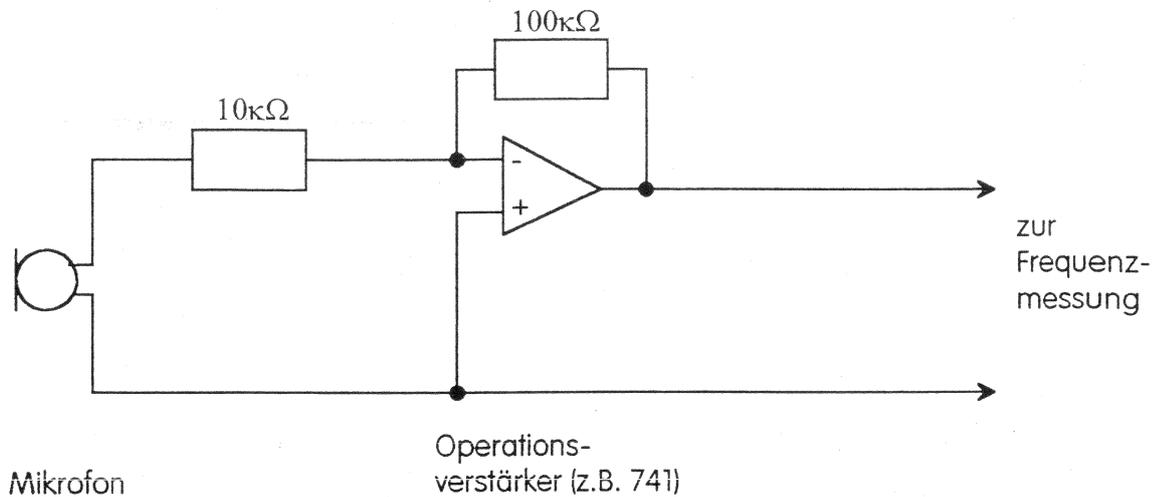
D 5.6 Stehende Ultraschallwellen

Wird der Ultraschallsender mit einem Generator verstellbarer Frequenz betrieben, so muß diese so eingestellt werden, daß optimale Schwingungen entstehen (Kontrolle mit Empfänger und Oszilloskop).



D 5.7 Untersuchung einer Blockflöte

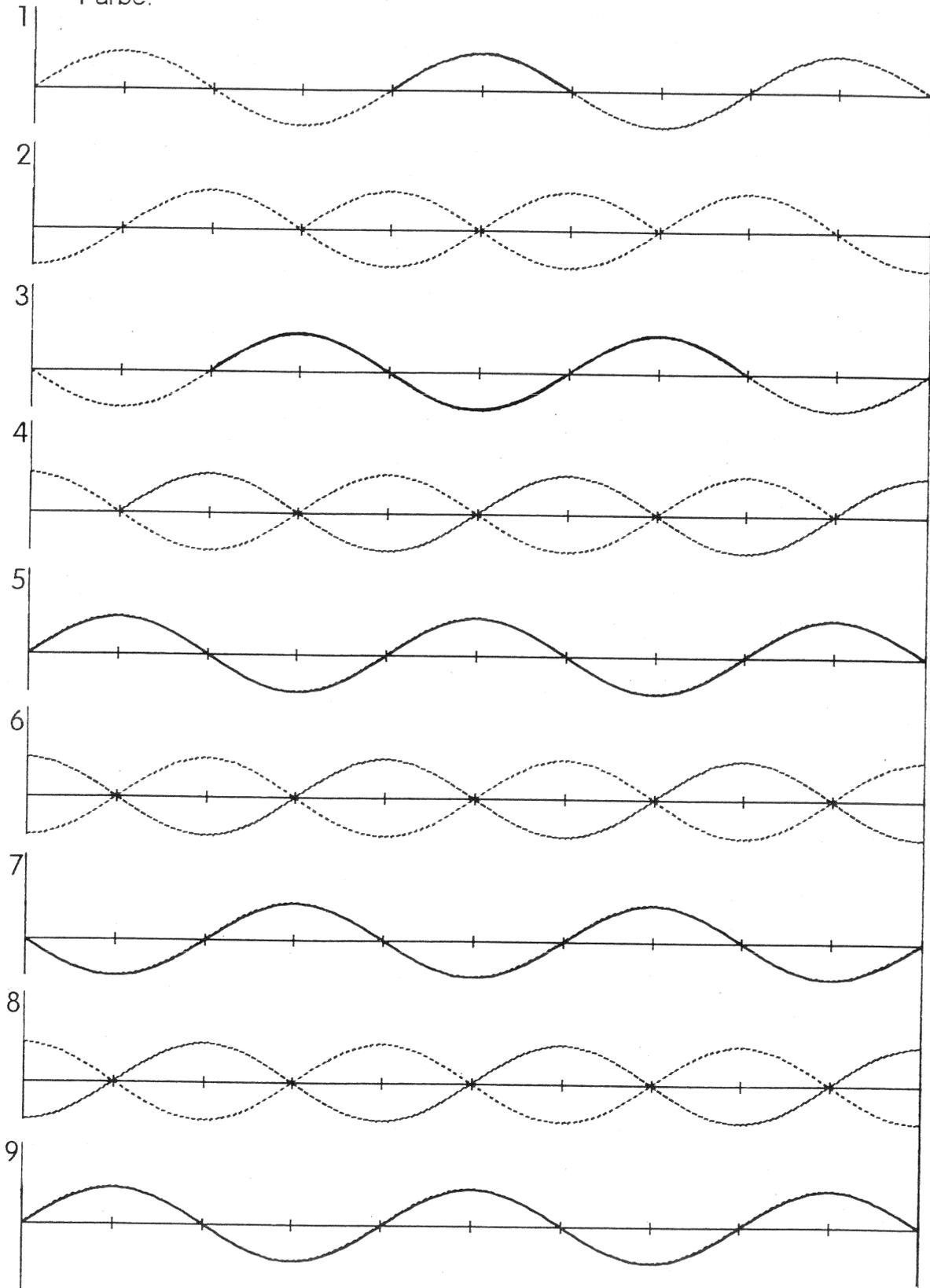
Mit einer Blockflöte wird der Grundton gespielt. Die Frequenz wird gemessen. Die Blockflöte hat etwa die Länge einer halben Wellenlänge. Zur Frequenzmessung vgl. D 1.2. Eventuell muß das Mikrofon-Signal zusätzlich verstärkt werden:



Meßbeispiel: Für eine C-Flöte wurde die Frequenz 528 Hz gemessen. Bei einer Schallgeschwindigkeit von $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich für die halbe Wellenlänge ein Wert von 32 cm. Diese Strecke stimmt etwa mit der Länge der Blockflöte überein.

5.5 Aufgabenbeispiele

A 5.1 Gegeben sind die folgenden Momentaufnahmen von zwei einander entgegelaufenden Wellen. Kennzeichnen Sie in den neun Bildern jeweils die nach rechts und die nach links laufende Welle mit unterschiedlichen Farben und skizzieren Sie jeweils die Überlagerung der beiden gegebenen Wellen mit einer dritten Farbe.



- A 5.2** Ein Ende eines Seiles wird fest eingespannt. Das andere Ende wird mit einer Frequenz von 4,00 Hz auf und ab bewegt. Es bildet sich eine stehende Welle aus. Der Abstand zweier benachbarter Knoten beträgt 1,60 m.
- Wie groß ist die Wellenlänge?
 - Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle?
 - Bei welcher Frequenz wäre der Knotenabstand 1,20 m?
- A 5.3** Die A-Saite einer Geige (Grundton a^1 , Frequenz 440 Hz) wird in der Mitte angezupft.
- Geben Sie einen Oberton an, der bei diesem Anzupfen im Klang der Geige fehlt.
 - Geben Sie allgemein die Frequenzen aller Obertöne in Abhängigkeit von der Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der Saitenlänge l an, die bei diesem Anzupfen im Klang der Geige fehlen.
- A 5.4** Eine Geigensaite der Länge 33,0 cm schwingt mit 440 Hz (a^1).
- Wo muß die Saite niedergedrückt werden, damit sich eine Frequenz von 660 Hz (e^2) ergibt?
 - Nehmen Sie an, man würde diese Stelle um 0,5 cm verfehlen. Welche Frequenz hätte der dann erzeugte Ton?
- A 5.5** Ein Tongenerator sendet Schallwellen aus, die senkrecht auf eine Wand treffen und an dieser reflektiert werden. 10 cm vor der Wand steht ein Mikrofon. Bei welchen Frequenzen des Tongenerators wird das Mikrofonsignal am schwächsten zu empfangen sein? (Hinweis: Experimentell wurde festgestellt, daß sich an der Wand ein Knoten befindet.)
- A 5.6** Man läßt Wasser in ein hohes, schlankes Gefäß laufen. Erklären Sie, warum und wie sich die Höhe des Tones ändert, den man dabei hört.
- A 5.7** Ein senkrecht stehendes Glasrohr ist über einen Schlauch mit einem Ausgleichsgefäß verbunden. Durch Anheben und Absenken des Ausgleichsgefäßes kann die Wasserstandshöhe im Resonanzrohr verändert werden. Über dem oberen (offenen) Ende des Resonanzrohres wird eine Stimmgabel ($f = 1700$ Hz) angeschlagen. Der Ton wird bei bestimmten Längen s der Luftsäule (Abstand des Wasserspiegels vom oberen Rohrende) sehr deutlich verstärkt. Gemessen wurden zwei mögliche Längen: $s_1 = 15,2$ cm; $s_2 = 25,3$ cm.
- Welcher Wert ergibt sich aus diesen Meßwerten jeweils für die Schallgeschwindigkeit in Luft?
 - Geben Sie jeweils eine kleinere Länge s_3 und eine größere Länge s_4 an, bei denen der Ton auch laut zu hören ist.
 - Bei welchen Resonanzrohrängen würde man Verstärkung erhalten, wenn man das Rohr mit CO_2 füllen würde? Die Schallgeschwindigkeit in CO_2 beträgt bei 25°C $272 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

A 5.8 In einem 60,0 cm langen, beiderseits offenen Glasrohr werden mit Hilfe von Tongenerator und Lautsprecher stehende Schallwellen erzeugt. Die stehenden Wellen werden mit der Kundtschen Staubfigurenmethode nachgewiesen. Bei einer Frequenz von $f_1 = 1\,110$ Hz bilden sich vier, bei einer Frequenz von $f_2 = 1\,400$ Hz bilden sich fünf Knoten aus. Welcher Wert ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit aus diesen Messungen?

A 5.9 In einem mit CO_2 gefüllten Kundtschen Rohr werden mit Hilfe eines Tongenerators ($f = 2\,260$ Hz) und eines Lautsprechers Staubfiguren erzeugt. Der Abstand zweier benachbarter Knoten wird gemessen: $s = 6,0$ cm.

a) Welche Schallgeschwindigkeit ergibt sich für CO_2 ?

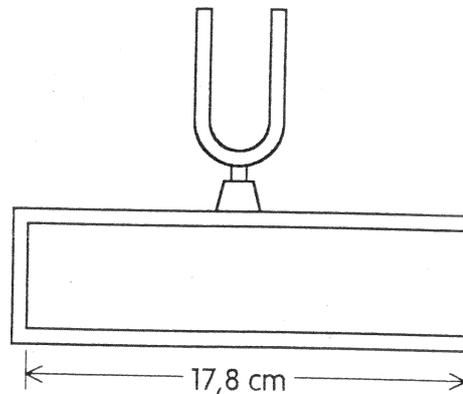
b) Welchen Knotenabstand würde man erhalten, wenn man bei sonst gleicher Versuchsdurchführung Luft statt CO_2 verwenden würde?

A 5.10 Ein in der Mitte eingespannter Kupferstab der Länge 80,0 cm wird durch Reiben zu Schwingungen angeregt. Sein eines Ende (mit Stempel) ist in ein Kundtsches Rohr gesteckt. Er erzeugt in diesem Rohr stehende Schallwellen mit einem Knotenabstand von 7,1 cm. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in Kupfer, wenn die Schallgeschwindigkeit in Luft $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt?

A 5.11 In der Physiksammlung gibt es eine Resonanzstimmgabel für den Kammerton a^1 (440 Hz). Der Innenraum des Resonanzkastens hat eine Länge von 17,8 cm.

a) Bei welcher Schallgeschwindigkeit kann der Ton der Stimmgabel am besten verstärkt werden?

b) Wie muß das Ergebnis von a) verändert werden, wenn man berücksichtigt, daß ein Schwingungsbauch nicht direkt an der Öffnung, sondern etwas außerhalb des Resonanzkastens liegt?



A 5.12 Mit zwei Pfeifen, einer offenen und einer gedackten¹⁰⁾, werden gleiche Grundtöne erzeugt.

a) Wie müssen sich die Längen der beiden Pfeifen zueinander verhalten?

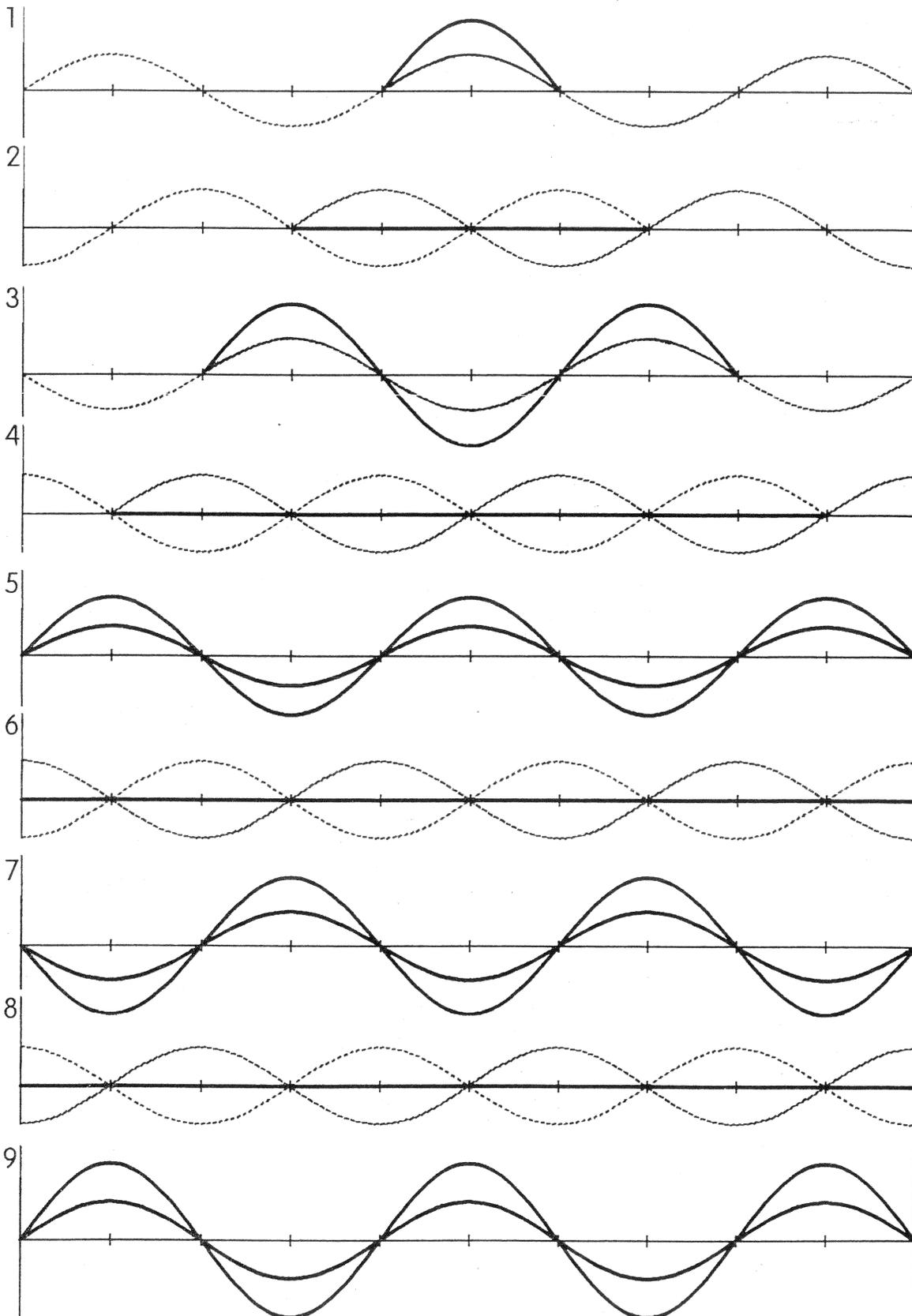
b) Wie ist es zu erklären, daß die beiden Pfeifen trotz gleicher Grundtöne unterschiedlich klingen?

¹⁰⁾ gedackt: ein geschlossenes Ende

- A 5.13** Eine offene Orgelpfeife erzeugt den Kammerton a (440 Hz).
- Wie lang ist die Pfeife?
 - Welcher Ton entsteht, wenn man das offene Ende verschließt?
- A 5.14** Eine offene Pfeife wird zunächst mit Luft, dann mit einem anderen Gas angeblasen. Dabei steigt die Frequenz etwa um eine Quinte. Was läßt sich daraus schließen?
- A 5.15** Ein Badezimmer eignet sich gut als Resonanzkörper für menschliche Stimmen.
- Weshalb werden verschiedene Frequenzen verstärkt?
 - Weshalb ist das Badezimmer besonders für Männerstimmen ein guter Resonanzkörper?
 - Was bedeutet es für die bevorzugten Frequenzen, wenn die Badezimmertür geöffnet wird?
- A 5.16** Eine Duschkabine (0,90 m x 0,90 m x 2,40 m) kann näherungsweise als 2,40 m lange, beidseitig geschlossene Orgelpfeife betrachtet werden. Die tiefen Resonanzfrequenzen werden durch die duschende Person kaum verändert.
- Berechnen Sie die Grundfrequenz und die Frequenzen der ersten drei Oberschwingungen.
 - In der dreidimensionalen Duschkabine sind auch stehende Wellen in horizontaler Richtung möglich. Zeigen Sie, daß die Grundfrequenz der horizontalen Schwingung zwischen der 1. und 2. Oberschwingung der vertikalen Wellen liegt.

Lösungen

zu A 5.1



zu A 5.2 a) $\lambda = 3,20 \text{ m}$

b) $c = 4,00 \text{ Hz} \cdot 3,20 \text{ m} = 12,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

c) Bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit und einer Verkleinerung der Wellenlänge muß sich die Frequenz entsprechend vergrößern:

Aus $\lambda_1 \cdot \frac{3}{4} = \lambda_2$ folgt $f_1 \cdot \frac{4}{3} = f_2$, also $f_2 = \frac{4}{3} \cdot 4,00 \text{ Hz} = 5,33 \text{ Hz}$

Die Frequenz läßt sich auch aus der Geschwindigkeit in Teilaufgabe b) und der neuen Wellenlänge berechnen:

$$f_2 = \frac{12,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 1,20 \text{ m}} = 5,33 \text{ Hz}$$

zu A 5.3 a) In der Mitte der Saite wird durch das Anzupfen ein Schwingungsbauch erzeugt. Die Oktave a^2 kann als Oberton im Klang der Geige nicht vorkommen.

b) Es fehlen alle die Obertöne, bei denen in der Mitte der Saite ein Schwingungsknoten sein müßte, also die Obertöne, für die die Saitenlänge ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist.

Zu A 5.4 a) Aus $\frac{1}{2} \cdot \lambda_1 \cdot 440 \text{ Hz} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_2 \cdot 660 \text{ Hz}$ folgt $\frac{1}{2} \cdot \lambda_2 = 22,0 \text{ cm}$.

b) $\lambda_{2a} = 2 \cdot 21,5 \text{ cm}; f_{2a} = 675 \text{ Hz}.$ $\lambda_{2b} = 2 \cdot 22,5 \text{ cm}; f_{2b} = 645 \text{ Hz}.$

zu A 5.5 10 cm vor der Wand muß sich (wie auch an der Wand) ein Knoten befinden. Die Strecke von 10 cm muß also ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{1}{2} \cdot \lambda$ sein,

also $10 \text{ cm} = n \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda_n$ mit $n \in \mathbb{N}^*$.

Für die Frequenz folgt dann $f_n = \frac{n \cdot c}{20 \text{ cm}}$.

Mit $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gilt: $f_n = n \cdot 1700 \text{ Hz}$ mit $n \in \mathbb{N}^*$.

zu A 5.6 Das Wasser erzeugt beim Auftreffen auf der Wasseroberfläche ein Geräusch. Für eine bestimmte Frequenz (und zugehörige Obertöne) bildet sich in dem Gefäß eine stehende Welle aus, für die ein Viertel der Wellenlänge mit der Länge der Luftsäule übereinstimmt. Der zugehörige Ton wird verstärkt wahrgenommen. Wird die Länge der Luftsäule kontinuierlich verringert, so vergrößert sich beim Einlaufen des Wassers ständig die Frequenz, und damit nimmt die Höhe des wahrgenommenen Tones zu.

- zu A 5.7 a) Da sich bei Verstärkung eines Tones an der Wasseroberfläche ein Schwingungsknoten, an der oberen Rohröffnung ein Schwingungsbauch ausbildet, muß für die bevorzugten Längen s_n gelten: $s_n = (\frac{1}{4} + n \cdot \frac{1}{2}) \cdot \lambda$.

Da die Schallgeschwindigkeit in Luft etwa $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt, muß sich für die Wellenlänge bei $f = 1\,700 \text{ Hz}$ etwa ein Wert von 20 cm ergeben. Es muß also gelten:

$$s_1 = (\frac{1}{4} + 1 \cdot \frac{1}{2}) \cdot \lambda_1, \text{ also } \lambda_1 = 20,27 \text{ cm und } c_1 = 344,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$$\text{Entsprechend: } s_2 = (\frac{1}{4} + 2 \cdot \frac{1}{2}) \cdot \lambda_2, \text{ also } \lambda_2 = 20,24 \text{ cm und } c_2 = 344,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Der Mittelwert aus beiden Messungen ergibt dann: $c = 344,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

- b) Mit den Werten von c und f (oder als Mittelwert von λ_1 und λ_2) folgt:
 $\lambda = 20,26 \text{ cm}$.

$$s_3 = (\frac{1}{4} + 0 \cdot \frac{1}{2}) \cdot 20,26 \text{ cm} = 5,07 \text{ cm}$$

$$s_4 = (\frac{1}{4} + 3 \cdot \frac{1}{2}) \cdot 20,26 \text{ cm} = 35,5 \text{ cm}$$

- c) Jetzt müßte die Wellenlänge $16,0 \text{ cm}$ betragen.

Aus $s_n = (\frac{1}{4} + n \cdot \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ ergeben sich die möglichen Resonanzrohrängen: $s_n = 4,0 \text{ cm} + n \cdot 8,0 \text{ cm}$ mit $n \in \text{IN}$.

- zu A 5.8 Da sich an den Enden des Kundtschen Rohres Schwingungsbäuche ausbilden, läßt sich leicht abzählen, wie viele viertel Wellenlängen gleich der Länge l des Rohres sein müssen:

$$\text{Im ersten Fall gilt: } l = 8 \cdot \frac{1}{4} \cdot \lambda_1, \text{ also } \lambda_1 = 30,0 \text{ cm},$$

$$\text{im zweiten Fall gilt: } l = 10 \cdot \frac{1}{4} \cdot \lambda_2, \text{ also } \lambda_2 = 24,0 \text{ cm}.$$

Mit den bekannten Frequenzen folgt:

$$c_1 = f_1 \cdot \lambda_1 = 1110 \text{ Hz} \cdot 0,300 \text{ m} = 333 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$c_2 = f_2 \cdot \lambda_2 = 1400 \text{ Hz} \cdot 0,240 \text{ m} = 336 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Als Mittelwert ergibt sich dann eine Schallgeschwindigkeit von $c = 334,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Das Experiment, das dieser Aufgabe zugrunde liegt, kann leicht durchgeführt werden.

- zu A 5.9 a) Die Wellenlänge beträgt $12,0 \text{ cm}$. Mit der eingestellten Frequenz ergibt sich dann für CO_2 eine Schallgeschwindigkeit von $271 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

- b) Nimmt man eine Schallgeschwindigkeit von $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ an, dann muß die Wellenlänge bei der gegebenen Frequenz etwa 15 cm betragen. Der Knotenabstand muß dann etwa $7,5 \text{ cm}$ sein.

zu A 5.10 Aus der Schallgeschwindigkeit in Luft und aus der Wellenlänge (gleich doppeltem Knotenabstand) läßt sich die Frequenz berechnen:

$$f = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,142\text{m}} = 2390 \text{ Hz}$$

Da die Wellenlänge in Kupfer (Grundschiwingung) gleich der doppelten Stablänge ist, ergibt sich: $c_{\text{Cu}} = 1,60 \text{ m} \cdot 2390 \text{ Hz} = 3830 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

zu A 5.11 a) Im Resonanzkasten bildet sich eine stehende Welle aus. Die Länge des Kastens ist gleich einer viertel Wellenlänge (Grundschiwingung).

$$\text{Daraus ergibt sich: } c = f \cdot \lambda = 440 \text{ Hz} \cdot 4 \cdot 0,178 \text{ m} = 313 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

b) Liegt der Schwingungsbauch außerhalb des Resonanzkastens, so wird die Wellenlänge etwas größer. Mit größerer Wellenlänge ergibt sich auch eine größere Schallgeschwindigkeit. Für die Schallgeschwindigkeit bei Zimmertemperatur erwartet man auch einen größeren Wert, als er bei a) berechnet wurde. Für $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erhält man für den Abstand Knoten - Bauch eine Strecke von 19,3 cm.

zu A 5.12 a) Die offene Pfeife hat die Länge einer halben Wellenlänge des Grundtones; die gedackte Pfeife hat die Länge einer viertel Wellenlänge des Grundtones. Die gedackte Pfeife ist für den gleichen Grundton also nur halb so lang wie die offene Pfeife: $l_{\text{offen}} : l_{\text{gedackt}} = 2 : 1$.

b) Es bilden sich unterschiedliche Obertöne aus, daher klingen die beiden Pfeifen auch unterschiedlich. Bei der gedackten Pfeife kann z.B. die Oktave zum Grundton nicht entstehen. Bei der offenen Pfeife sind zum Grundton mit der Frequenz f alle Obertöne mit den Frequenzen $2 \cdot f$, $3 \cdot f$, $4 \cdot f$, ... möglich. Bei der gedackten Pfeife können nur die Obertöne mit den Frequenzen $3 \cdot f$, $5 \cdot f$, ... entstehen.

zu A 5.13 a) Bei einer Schallgeschwindigkeit von $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich für die Frequenz von 440 Hz eine Wellenlänge von 77,3 cm. Die offene Pfeife muß die Länge einer halben Wellenlänge haben, also 38,6 cm lang sein.

b) Bei einer gedackten Pfeife der gleichen Länge entsteht ein Grundton mit doppelter Wellenlänge, also mit halber Frequenz (220 Hz).

zu A 5.14 Die Wellenlänge ist aufgrund der Pfeifenlänge festgelegt. Die Frequenzen von Grundton und Quinte verhalten sich wie 2 : 3. Da sich die Frequenz vergrößert, muß auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit entsprechend größer sein. Bei $c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich daher für die Schallgeschwindigkeit in dem verwendeten Gas: $c_{\text{Gas}} = 510 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Steht eine Möglichkeit zur Verfügung, die Frequenz zu messen, dann bietet die Untersuchung dieser stehenden Wellen auch die Möglichkeit zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.

zu A 5.15 a) Es können sich unterschiedliche stehende Wellen ausbilden. Dafür können zwei Gründe genannt werden:

1. Das Zimmer hat in den drei verschiedenen Richtungen meistens unterschiedliche Abmessungen.
2. Es können nicht nur für die Grundtöne, sondern auch für die Obertöne stehende Wellen entstehen.

b) Eine Strecke von etwa 2 m wäre die halbe Wellenlänge für einen Grundton mit der Frequenz von etwa 85 Hz. Solche Töne sind für Frauenstimmen zu tief.

Die nachfolgende Tabelle gibt etwa den Frequenzumfang der vier Stimmlagen an.

Stimmlage	Frequenzumfang	
Sopran	270 Hz	– 1040 Hz
Alt	190 Hz	– 730 Hz
Tenor	140 Hz	– 460 Hz
Baß	75 Hz	– 300 Hz

c) Bei offener Badezimmertür kann sich an der Tür ein Schwingungsbauch ausbilden. Es kann jetzt - gegenüber dem Grundton bei geschlossener Badezimmertür - ein Ton verstärkt werden, der eine Oktave tiefer liegt (doppelte Wellenlänge, halbe Frequenz). Außerdem können jetzt weitere Obertöne des ursprünglichen Grundtones verstärkt werden, z.B. die Quinte.

zu A 5.16 a) Die gesuchten Frequenzen findet man, wenn man die Höhe der Duschkabine gleich der halben Wellenlänge (Grundton) bzw. gleich der einfachen, der eineinhalbfachen, der doppelten Wellenlänge (Obertöne) setzt:

Ton	Wellenlänge	Frequenz ¹⁾
Grundton	4,80 m	71 Hz
1. Oberton	2,40 m	142 Hz
2. Oberton	1,60 m	213 Hz
3. Oberton	1,20 m	283 Hz

b) Für $\frac{1}{2} \cdot \lambda = 0,90 \text{ m}$ ergibt sich die Grundfrequenz $f_0 = 189 \text{ Hz}$.

¹⁾ Die Frequenzen wurden mit $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ berechnet.