

Katharina Wiespeiner

Physikalische Versuche zu Schwingungen und Wellen

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
Magistra
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Karl – Franzens - Universität Graz

Ao. Univ.- Prof. Dipl.- Ing. Dr. Gernot Pottlacher
Technische Universität Graz
Institut für Experimentalphysik

Juli 2006

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bedanken bei:

- ... Herrn Ao. Univ.- Prof. Dipl.- Ing. Dr. Gernot Pottlacher, dass ich diese Diplomarbeit verfassen durfte, für die ausgezeichnete Betreuung, für die Verfügungstellung der Räumlichkeiten und Geräte und für die auffordernden und motivierenden Worte, die eine gute Zusammenarbeit ermöglichten.
- ... Herrn Dr. Boris Wilthan für seine Hilfestellungen.
- ... Herrn Daniel Gruber für die Einführungen in diverse Softwareprogramme und seine Hilfe beim Erstellen der DVD.
- ... Robert, Anna und Thomas für die Mitarbeit bei den Experimenten vor der Kamera.
- ... Barbara Raschke für das Filmen, die gute Zusammenarbeit und das Entgegenkommen in der Zeiteinteilung während dem Entstehen der Arbeit.
- ... meiner Mama für das Korrekturlesen.
- ... meinen Eltern für die moralische und finanzielle Unterstützung während meiner gesamten Schul- und Studienzeit.

Vorwort

Leider wurden mir erst im Studium viele Möglichkeiten aufgezeigt, wie man Versuche in den Unterricht einbringen kann. Durch Laborübungen und die beiden Lehrveranstaltungen „Schulversuche I“ und „Schulversuche II“ lernte ich nicht nur jede Menge physikalische Experimente kennen, auch mein Interesse an ihnen wurde verstärkt.

Als sich mir dann die Möglichkeit bot, meine Diplomarbeit über Versuche zu Schwingungen und Wellen zu schreiben, nutzte ich sie. Um nicht gefährdet zu sein, beim Schreiben abzuschweifen, haben mein Betreuer und ich im vornhinein einige Richtlinien aufgestellt:

- Es sollen ungefähr 50 Versuche behandelt werden, die ein möglichst breites Spektrums des Themengebietes beinhalten.
- Die Versuche sollen mit möglichst einfachen Hilfsmitteln durchführbar sein.
- Die Erklärungen sollen möglichst einfach sein.
- Zu den Versuchen sollen Videosequenzen gedreht werden, um Effekte möglichst gut zu veranschaulichen.

Dabei liegt der Schwerpunkt auf das Beilegen der Videosequenzen, denn sehr viele der erwähnten Versuche sind bereits in Büchern oder im Internet verfügbar. Allerdings sind dabei meist nur Skizzen angeführt. Ich möchte aber durch das Vorzeigen im Video die physikalischen Ergebnisse präsentieren und auch das Nachahmen erleichtern. Die zu den jeweiligen Experimenten angeführten Abbildungen sind Standbilder aus diesen Videosequenzen. Bei meiner Auswahl habe ich mich so gut wie möglich auf Unterlagen der Lehrveranstaltung „Schulversuche I“ an der Technischen Universität Graz gestützt, da sich dort in den letzten 15 Jahren eine Sammlung von Videoclips und Beschreibungen zu Versuchen angesammelt haben. Um eine möglichst gute Struktur vorweisen zu können, habe ich mich streng an das Skriptum für Experimentalphysik von Prof. H. Jäger gehalten, das auf der Technischen Universität in der Vorlesung auch heute noch verwendet wird.

Da sich der Bereich zu Schwingungen und Wellen mit Optik und Akustik überschneidet, möchte ich hier auch noch auf die Diplomarbeit von David Auer: „Physikalische Freihandversuche aus Optik“ hinweisen, der in seiner Arbeit sehr viele Versuche angeführt hat, die ich nicht behandelt habe.

Es ist meiner Meinung nach sehr wichtig, den Schülern und Schülerinnen im Unterricht die Möglichkeit zu bieten, selbständig zu arbeiten, ist es unumgänglich Versuche mit einzubeziehen. Mit meiner Diplomarbeit möchte ich deswegen einige Beispiele für Versuche liefern, die man leicht im Unterricht durchführen kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Fachdidaktisches	3
1.1	Was ist ein Freihandversuch?	3
1.2	Die fachdidaktische Bedeutung des Experiments.....	4
1.3	Forderung des Lehrplans	6
1.3.1	Forderungen des Lehrplans der AHS- Unterstufe	6
1.3.2	Forderungen des Lehrplans der AHS- Oberstufe	7
2	Schwingungen.....	8
2.1	Grundsätzliches	8
2.2	Ungedämpfte, harmonische Schwingung.....	13
2.2.1	Linearer, harmonischer Oszillator	13
2.2.2	Harmonische Kreisschwingung	16
2.3	Gedämpfte Schwingung.....	21
2.4	Erzwungene Schwingung.....	22
2.5	Überlagerung von Schwingungen	27
2.5.1	Parallele Schwingrichtung.....	27
2.5.1	Schwebung	28
2.5.3	Schwingungsrichtungen senkrecht zueinander.....	30
2.6	Gekoppelte Schwingungen	31
2.7	Eigenschwingungen	34
2.7.1	Eigenschwingungen von linearen Festkörpern und Flüssigkeits- bzw. Gassäulen	34
2.7.2	Eigenschwingungen von Flächen und Körpern.....	38
3	Wellen	40
3.1	Grundsätzliches	40
3.2	Verschiedene Arten von Wellen	42
3.2.1	Elastische Wellen im Festkörper	42
3.2.2	Dichtewellen in Flüssigkeiten und Gasen	45

3.3	Der Dopplereffekt bei mechanischen Wellen.....	52
3.4	Reflexion und Brechung	54
3.4.1	Das Huygens- Fresnelsche Prinzip	59
3.4.2	Dispersion.....	64
3.5	Überlagerung von Wellen und Interferenz.....	65
3.5.1	Stehende Wellen	66
3.5.3	Optische Interferenzen	76
3.6	Beugung.....	79
3.7	Polarisiertes Licht.....	80
4	Literaturverzeichnis.....	84

1 Fachdidaktisches

Heute ist der Alltag voll mit Geräten, deren Aufbau und Funktionsweisen schon lange nicht mehr leicht erklärbar sind. Deswegen finde ich es wichtig, dass man schon im Unterricht Versuche einbringt, die leicht verständlich und durchschaubar sind. Dadurch werden die Stunden nicht nur abwechslungsreicher, sondern fördern im Idealfall auch das Interesse und das Verständnis an Physik.

1.1 Was ist ein Freihandversuch?

Auch wenn der Begriff Freihandversuch bzw. Freihandexperiment relativ jung ist, ist die Anwendung eines solchen nichts Neues. Schon Albert Einstein beschäftigte sich mit einem sog. Freihandversuch, der das Verhalten eines Teeblattes in einer Teetasse erklären sollte. Der „große Boom“ ist jedoch erst im Zuge neuer Techniken aufgekommen, die riesige, komplizierte Apparaturen zur Demonstration physikalischer Sachverhalte verwendeten.

H. HAHN [1] war einer der ersten, die den Freihandversuch öffentlich erwähnten. In seinem Buch „Physikalische Freihandversuche“, das er 1905 vorstellte, definierte er den Freihandversuch folgendermaßen:

Bei der Lösung meiner Aufgabe war es notwendig, die Freihandversuche gegen die eigentlichen Schülerversuche, die Schülerübungen und die Spiele abzugrenzen. Aufgenommen wurden neben den Versuchen mit den Gegenständen des täglichen Gebrauchs auch Versuche mit einfachen Vorrichtungen, die jeder Lehrer selbst herstellen kann, wenn er die Werkzeuge besitzt, die ein gut ausgestatteter Nagelkasten, wie er in jedem Haushalt vorhanden ist, zu enthalten pflegt.

Eine mehr aus der schulischen Sicht ausgehende Definition ist von B. KORN [2]:

Der Freihandversuch ist ein weitgehend qualitatives physikalisches Lehrer-, Schüler- oder Hausexperiment, das im Wesentlichen mit Gegenständen des täglichen Bedarfs und mit einfachen Lehrmitteln jederzeit eingesetzt werden kann.

Ganz allgemein kann man Freihandversuche mit folgenden Eigenschaften charakterisieren: Man verwendet Gegenstände des täglichen Lebens, der Aufbau besteht aus nur wenigen Teilen, schon nach kurzer Vorbereitungszeit ist eine Durchführung des Experiments möglich, und man macht durch den Versuch quantitative Aussagen physikalischer Gesetze.

Man kann Freihandversuche noch weiter differenzieren:

Klassische Freihandversuche:

Zur Durchführung verwendet man hauptsächlich Gegenstände aus dem täglichen Gebrauch.

Sekunden- Experimente:

Wie der Name bereits verrät, benötigt man hier für derartige Experimente eine geringe Vorbereitungszeit. Die verwendeten Geräte können zwar teuer sein, stehen aber jederzeit bereit.

Low- Cost. Experimente:

Hier verwendet man vorwiegend Dinge, die man jederzeit im Haushalt anfindet, die man nicht extra kaufen muss.

1.2 Die fachdidaktische Bedeutung des Experiments

Bei der Planung des Physikunterrichts sollte sich jeder Lehrer/ jede Lehrerin Gedanken über den Einsatz von Versuchen machen, in denen er/ sie folgende Fragen berücksichtigen soll:

- **Warum** Versuche?
- **Wann** Versuche?
- **Welche** Versuche?

Warum sollen Versuche im Physikunterricht durchgeführt werden?

Ganz egal, ob es sich um Schüler- oder Lehrerversuche handelt, man kann den Unterricht wesentlich abwechslungsreicher gestalten. Bei beiden Arten sollte man sich jedoch über die Vor- und Nachteile Gedanken machen. Mit den Versuchen möchte man Interesse erwecken und motivieren.

Bei Schülerversuchen hat man den großen Vorteil, dass sich die Schüler und Schülerinnen selbst mit dem Problem bzw. dem Sachverhalt auseinandersetzen. Hier kann man nach dem Prinzip „Learning by Doing“ arbeiten. Jedoch sind manche Versuche sehr aufwendig, oder die Ausstattung der Schule ist nicht ausreichend um ein Schülerexperiment durchführen zu können. Dann bietet sich ein Lehrerexperiment an.

Wichtig ist auch die Erkenntnis, dass nicht alle Versuche so ausgehen, wie man vorher angenommen hat. Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Experiment ist notwendig.

Wann sollen Versuche im Physikunterricht eingesetzt werden?

Hier muss man sich nach den Erfordernissen im Unterricht richten. Was will ich mit dem Experiment bewirken? Soll es Neugier wecken oder einen Sachverhalt darstellen?

Mögliche Einsätze sind:

Exemplarischer Einstieg:

Um ein neues Kapitel einzuleiten bieten sich Versuche mit großem Überraschungseffekt an um die Schüler und Schülerinnen neugierig zu machen. Aber auch der Lerninhalt sollte klar ersichtlich sein.

Versuch zur Bestätigung des Erlernten:

Eine Verbindung zwischen Theorie und Experiment ist für das Verständnis unentbehrlich. Mit Hilfe von Versuchen soll dieses Verbinden erleichtert werden und auch ein kritisches Denken und Hinterfragen fördern.

Schülerexperiment:

Der Lernerfolg ist am größten, wenn man es selbst erlebt. Außerdem kann man hier alternative Unterrichtsformen wie Partner- oder Gruppenarbeit einsetzen.

Referat:

Gezielt ausgewählte Versuche können ein Referat abwechslungsreicher, attraktiver aber auch einprägsamer machen.

Überprüfung:

Bei vielen Wiederholungen wird auf im Unterricht gezeigte Versuche eingegangen. Oft erinnern sich die Schüler und Schülerinnen nicht mehr gut. Verwendet man Freihandversuche, ist eine nochmalige Durchführung, eventuell von den Schülern und Schülerinnen, möglich.

Welche Versuche sollen im Physikunterricht durchgeführt werden?

Der Lehrer/ die Lehrerin muss wissen, was er/ sie mit dem Versuch erreichen will. Welchen Zweck hat der Versuch?

Ausgehend davon kann eine Auswahl getroffen werden, bei der man sich auch über die Anzahl Gedanken machen sollte. Bei zu wenigen Versuchen können die Schüler und Schülerinnen kaum selbständig arbeiten, bei zu vielen verlieren sie den Überblick und somit das Interesse.

1.3 Forderung des Lehrplans

1.3.1 Forderungen des Lehrplans der AHS- Unterstufe

- **Bildungs- und Lehraufgaben:**

Der Unterricht hat das Ziel, den Schülerinnen und Schülern das Modelldenken der Physik (Realwelt – Modell – Modelleigenschaften – Realwelt) zu vermitteln und physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge zu stellen.

Dies geschieht durch:

- bewusstes Beobachten physikalischer Vorgänge;
- Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik;
- Erkennen von Gültigkeitsgrenzen physikalischer Gesetzmäßigkeiten in alltagsbezogenen Situationen;
- eigenständige und handlungsorientierte Auseinandersetzung mit Problemen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schülern nach Möglichkeit ausgehend von Schülerexperimenten;
- Entwicklung von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen und deren Anwendung bei physikalischen Vorgängen in Natur und Technik.

- **Kreativität und Gestaltung:**

Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten; Einfluss der Physik auf Ästhetik, Funktion und Design.

- Didaktische Grundsätze:

Ausgehend von konkreten Beobachtungen bzw. Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler sind unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten jeweils die zu Grunde liegenden physikalischen Inhalte zu erarbeiten.

Bei der Gewinnung von Gesetzen ist neben der Verallgemeinerung von Beobachtungen auf Grund von Experimenten gelegentlich auch die gedankliche Herleitung und anschließende experimentelle Überprüfung von Lösungsansätzen (Hypothesen) anzuwenden.¹

1.3.2 Forderungen des Lehrplans der AHS- Oberstufe

- Bildungs- und Lehraufgabe:

- ...insbesondere der Befähigung zum selbständigen Wissenserwerb, dem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt...
- Weiters soll die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag und in der Umwelt und für die Welterkenntnis erfasst und für ihre Lebensgestaltung genutzt werden..

Ziel des Physikunterrichts ist daher die Vermittlung des nötigen Rüstzeuges zum verstehenden Erleben von Vorgängen in Natur und Technik und keinesfalls nur das Informieren über sämtliche Teilgebiete der Physik.

Das Ziel ist der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen:

- ...
- eigenständig arbeiten können
- physikalische Zusammenhänge darstellen können
- einfache Experimente planen und durchführen können
- Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können²

¹ Quelle: <http://www.oepu-noe.at/recht/lp/us/pflicht/physik.htm>

² Quelle: <http://www.oepu-noe.at/recht/lp/os/pflicht/physik.htm>

2 Schwingungen

2.1 Grundsätzliches

Unter Schwingungen versteht man zeitlich periodische Vorgänge, bei denen nach einer bestimmten Periodendauer τ der gleiche Zustand (oder ein analoger wie z. B. bei einer Wackelschwingung) wiederkehrt. Das bedeutet für eine mechanische Schwingung, dass der schwingende Körper nach der Periodendauer τ wieder am gleichen bzw. analogen Ort ist.

Rollende Kugel in einer Petrischale

Material:

- Uhrglas
- Petrischale zum Fixieren der Schale
- Kugel

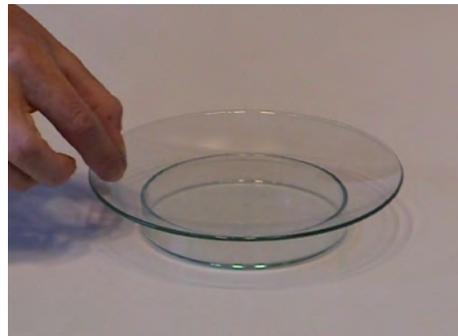


Abb. 1: Loslassen der Kugel

Aufbau und Durchführung:

Man lässt die Kugel an der oberen Kante des Uhrglases wegrollen. Die Kugel rollt hinunter, auf der anderen Seite wieder hinauf, wieder herunter ...

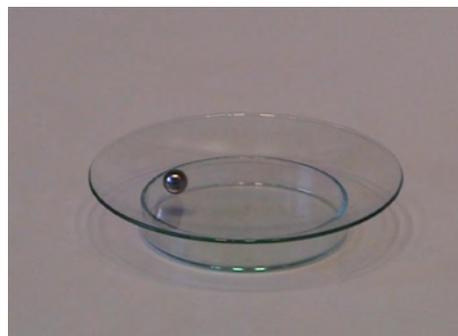


Abb. 2: Rollen der Kugel in der Petrischale

Physikalischer Hintergrund:

Beim Loslassen am hohen Rand besitzt die Kugel eine potentielle Energie W_{pot} von

$$W_{pot} = mgh \quad (1)$$

m ...Masse der Kugel

g ...Gravitationskonstante $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

h ...Höhe zwischen „Wegrollpunkt“ und Boden der Schale

Auf Grund der Erdanziehung beginnt sie nach unten zu rollen und die potentielle Energie wird nach und nach in kinetische Energie W_{kin} umgewandelt. Diese setzt sich aus ihrer kinetischen Energie der Translation W_{trans} und der Rotation W_{rot} zusammen.

$$W_{kin} = W_{trans} + W_{rot}$$
$$W_{kin} = m \frac{v^2}{2} + I \frac{\omega^2}{2} \quad (2)$$

v ... Geschwindigkeit der Kugel

I ... Trägheitsmoment der Kugel

ω ... Winkelgeschwindigkeit

Beim Durchlaufen der Ruhelage, also den Boden des Glases, ist die kinetische Energie am größten. Die Gesamtenergie der Kugel entspricht am Boden des Glases der kinetischen Energie, und die potentielle Energie an diesem Punkt verschwindet. Deswegen rollt sie auf der anderen Seite wieder hinauf bis die kinetische Energie wieder in potentielle Energie umgewandelt worden ist. Dann bewegt sie sich wieder hinunter...

Durch Reibungsverluste gelangt sie nicht mehr an die Lage, an der man sie losgelassen hat, sondern erreicht eine immer niedrigere Lage bis sie am Boden liegen bleibt.

Die Periodendauer muss nicht konstant bleiben, was man am Beispiel einer Wackelschwingung erkennen kann.

Wackelschwingung

Material:

- Prismatischer Körper (z. B. Holzblock)

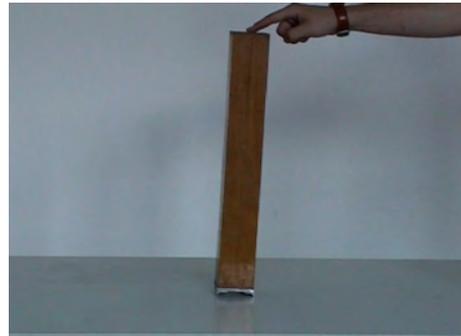


Abb. 3: Auslenkung des Holzblocks

Durchführung und Aufbau:

Man stellt den Körper auf und kippt ihn ein wenig zur Seite. Er wackelt dann von einer Seite zur anderen.

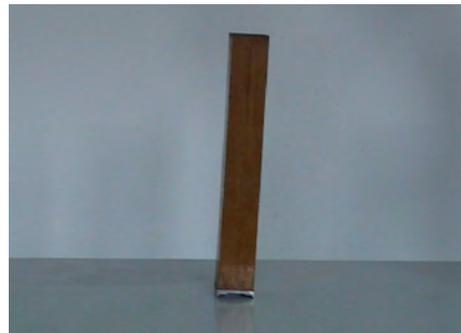


Abb. 4: Wackelschwingung

Physikalischer Hintergrund:

Da sich bei Auslenkung der Schwerpunkt nicht in einer stabilen Lage befindet, bewegt sich der Block. Ähnlich wie bei der Kugel in der Petrischale wird hier auch kinetische Energie in potentielle umgewandelt und umgekehrt.

Durch den Reibungsverlust kann der Block nicht mehr gleich wackeln. Der Neigungswinkel wird immer kleiner und die Periodendauer kontinuierlich kürzer. Der Körper wackelt immer schneller hin und her, bis er so viel seiner Energie an Reibung verloren hat, dass er gar nicht mehr zur Seite kippt.

Die Auslenkung kann verschiedenste Formen annehmen und muss nicht immer von der Ruhelage aus nach zwei Seiten erfolgen. Die Kippschwingung ist ein Beispiel dafür. Der zeitliche Verlauf zeigt eine Sägezahnfunktion.

Kippschwingung

Material:

- PET- Flasche
- Gebogenes Plastikrohr



Abb. 5: Befüllen der Flasche

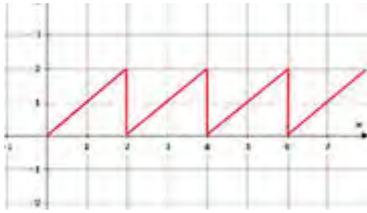
Aufbau und Durchführung:

Bei der PET- Flasche wird der Verschluss und der Hals abgeschnitten und am Boden ein Loch gebohrt. In das Loch steckt man das gebogene Rohr, sodass die Biegung innerhalb der Flasche ist. Um ein schönes Ergebnis zu bekommen, sollte man noch das Loch abdichten. Dann wird am oberen Ende Wasser hineingefüllt. Das Wasser steigt bis zum oberen Ende des Rohres, rinnt dann innerhalb kurzer Zeit bis zur Öffnung des gebogenen Endes des Rohres aus und steigt wieder.



Abb. 6: Erzeugen einer Kippschwingung

Physikalischer Hintergrund:



Grafik 1: Kippschwingung³

Die waagrechte Achse zeigt den zeitlichen Verlauf und die senkrechte die Füllhöhe des Wassers.

Eine Kippschwingung ist dadurch charakterisiert, dass die potentielle Energie immer nur nach einer Seite langsam zu und dann rasch abnimmt.

In diesem Versuch bedient man sich der Eigenschaft von Wasser, dass es immer „gleich hoch“ steigen möchte. Solange nicht der gesamte Schlauch unter Wasser steht, braucht es nicht abzurinnen. Erreicht der Wasserspiegel aber diese „Grenze“, rinnt es bis zum Anfang des Schlauches ab, da es im Inneren des Schlauches nicht höher steigen kann. Der Schlauch verhält sich wie ein Syphon.

Die maximale Zustandsänderung einer Schwingung (z. B. der maximale Ausschlag) nennt man Amplitude. Bleibt die Amplitude zeitlich konstant, bezeichnet man die Schwingung als ungedämpft. Diese ist allerdings auf Grund von unvermeidlichen Energieverlusten nicht realisierbar, sondern nur eine Idealisierung. Jedoch kann man mit Hilfe von dauernder Energiezufuhr mittels Selbststeuerung oder Rückkoppelung des Systems eine ungedämpfte Schwingung erzeugen. Dabei wird die durch Reibung verloren gegangene Energie aus einem Reservoir wieder zugeführt. Eine andere Möglichkeit ist die Anregung zu einer erzwungenen Schwingung, auf die ich später noch kommen werde.

Die „natürlichen“ Schwingungen sind gedämpfte Schwingungen. Bei ihnen nimmt die Amplitude mit der Zeit ab.

³ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kippschwingung>

2.2 Ungedämpfte, harmonische Schwingung

Bei harmonischen Schwingungen lässt sich der zeitliche Verlauf der Auslenkung mit einer Sinus- bzw. Kosinuskurve darstellen.

2.2.1 Linearer, harmonischer Oszillator

Hierbei handelt es sich um eine ungedämpfte Schwingung längs einer Geraden. Dies kann man annähernd mit einem Federpendel zeigen.

Federpendel

Material:

- Schraubenfeder
- Gewicht

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt die Feder an einer Aufhängung und hängt das Gewicht an die Feder. Dann lenkt man die Feder aus, indem man am Gewicht zieht. Das Gewicht schwingt auf und ab.



Abb. 7: Auslenkung des Pendels



Abb. 8: Federpendel

Physikalischer Hintergrund:

Nach der Auslenkung wird das Gewicht auf Grund der Federkraft wieder nach oben beschleunigt. Dem entgegen wirkt die Erdanziehung bis die Bewegung in einer gewissen Höhe zum Stillstand kommt und wieder nach unten beschleunigt wird; die Feder wird wieder gedehnt. Die auf und ab Bewegung kommt wegen Reibungsverlusten nach einiger Zeit zum Stillstand, weil die Reibung die Bewegung abbremst.

Eine exakte Darstellung kann durch die Schattenprojektion eines Punktes, der eine gleichförmige Kreisbewegung ausführt, erzeugt werden. Dabei sind die charakterisierenden Größen der Phasenwinkel bzw. die Phase φ zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Kreisfrequenz ω . Der Phasenwinkel φ ist dabei jener Winkel, der von dem Vektor, der vom Ursprung zum bewegten Punkt zeigt, und der Nullachse eingeschlossen wird. Bei der Kreisfrequenz ω handelt es sich um die Änderung des Phasenwinkels pro Zeiteinheit, also um die Winkelgeschwindigkeit.

Es gilt:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (3)$$

ν ...Frequenz

Da $\varphi = \omega t$ ist, gilt für die Auslenkung x zum Zeitpunkt t

$$x = x_0 \sin \varphi = x_0 \sin \omega t \quad (4)$$

x ...momentane Auslenkung

x_0 ...maximale Auslenkung oder Amplitude

Hier kann man sehen, dass es sich beim zeitlichen Verlauf der Auslenkung bei einer harmonischen Schwingung, je nachdem, ob der Massenpunkt von der Nullachse oder von der vertikalen Koordinatenachse ausgeht, um eine Sinus- oder Kosinusfunktion handelt.

Sinusdarstellung

Material:

- Becher
- Faden (ungefähr 1 m)
- Sand oder Wasser, das mit Tinte gefärbt ist
- Rolle Papier (z. B. Backpapier)

Aufbau und Durchführung:

In den Becherboden macht man ein kleines Loch, den Becher befestigt man so am Faden, dass das Loch auf der anderen Seite des Fadens ist. Dann füllt man den Becher mit Sand oder gefärbtem Wasser (Loch dabei zuhalten). Den Faden mit dem Becher lässt man wie ein Fadenpendel schwingen und zieht darunter das Papier vorbei. Der Sand oder das Wasser rinnen dabei auf das Papier und man kann den zeitlichen Verlauf der Schwingung am Papier erkennen.



Abb. 9: Sinusdarstellung

Physikalischer Hintergrund:

Bei jedem Körper wirkt bei einer Auslenkung aus der Ruhelage eine rücktreibende Kraft, die proportional zur Auslenkung wächst. Dabei kann es zu einer harmonischen Schwingung kommen, wie wir schon beim Federpendel gesehen haben.

Anhand dieses Versuchs erkennt man am Papier, dass der zeitliche Verlauf der Amplitude einer Sinus bzw. Kosinusfunktion folgt.

2.2.2 Harmonische Kreisschwingung

Hier möchte ich noch Beispiele zu einer harmonischen Schwingung eines Massenpunktes auf einer Kreisbahn anführen.

Drehpendel

Material:

- Körper auf einer Drillachse
- Stativstange

Aufbau und Durchführung:

Man stellt das Drehpendel mit Hilfe der Stativstange auf und lenkt es dann aus. Das Pendel führt eine Drehschwingung aus.



Abb. 10: Drehpendel

Physikalischer Hintergrund:

Bei einem Drehpendel bewirkt die Drillachse nach Auslenkung des Pendels eine rücktreibende Kraft, die eine Drehschwingung erzeugt.

Ebenes Fadenpendel (oder Schwerependel)

Material:

- Schnur
- Gewicht



Abb. 11: Auslenkung des Pendels

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt die Schnur an einem Ende am Gewicht und hält das andere Ende mit der Hand in die Höhe, sodass das Gewicht nach unten hängt. Lenkt man dann das Gewicht aus und lässt es dann los, schwingt es hin und her.



Abb. 12: Fadenpendel

Physikalischer Hintergrund:

Bei einem Fadenpendel schwingt eine an einem Faden hängende Masse in einer Ebene. Bei einer Auslenkung übernimmt die Schwerkraft die Rolle der rücktreibenden Kraft. Geht man vom idealisierten Fall aus, in dem man einen masselosen Faden und eine punktförmige Masse annimmt, handelt es sich um ein mathematisches Pendel.

Für die Schwingungsdauer τ (die wie beim freien Fall unabhängig von der Masse ist) gilt

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5)$$

l ... Pendellänge

Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels

Material:

- Gewicht
- Schnur



Abb. 13: Langes Fadenpendel

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt das Gewicht an einem Ende der Schnur und hält das andere Ende in einer Hand in die Höhe, sodass das Gewicht nach unten hängt. Schließlich lenkt man das Pendel wie beim Fadenpendel aus. Wenn man dann während der Auslenkung einen Finger in die Mitte zwischen Nullpunkt des Gewichts und der Hand, in der die Schnur ist, hält, schwingt das Pendel bis zum Finger. Dort wird die Pendellänge verkürzt und auf der anderen Seite schwingt es schneller weiter. Kehrt es wieder zurück und die Schnur ist nicht mehr am Finger, schwingt es wieder mit seiner ursprünglichen Geschwindigkeit.



Abb. 14: Kurzes Fadenpendel

Physikalischer Hintergrund:

Wie oben schon erwähnt gilt für die Schwingungsdauer Formel (5).

Wenn man den Finger hinhält, wird somit die Länge des Fadenpendels und somit die Schwingungsdauer verkürzt.

Metronom

Material:

- Mechanisches Metronom

Aufbau und Durchführung:

Man stellt das Metronom auf, zieht es auf und lenkt es aus. Dann verschiebt man das Gewicht und die Schwingungsdauer wird verändert.



Abb. 15: Metronom

Physikalischer Hintergrund:

Beim Metronom wird durch das Aufziehen eine Feder gespannt, die das Pendel schwingen lässt. Die Schwingungsdauer ist proportional zur Länge des „verkehrten“ Pendels. Verändert man dann die Länge indem man das Gewicht verschiebt ändert sich auch die Frequenz. Bei Maximaler Auslenkung ist jedes Mal ein Klicken zu hören, das durch Anschlag des Pendels im Inneren erzeugt wird. Im Hintergrund ist eine Skala angebracht, sodass man das Gewicht so einstellen kann, dass das Pendel in einer bestimmten Frequenz schwingt.

Die anhängliche Schnur

Material:

- Gewichtsstück (ca. 100 g) oder Schlüsselbund
- Schraubenmutter oder Zündholzschachtel
- Faden (ca. 40 cm)



Abb. 16: Halten der Zündholzschachtel

Aufbau und Durchführung:

Man bindet das Gewichtsstück und die Schraubenmutter an jeweils ein Ende des Fadens. Dann hängt man den Faden über einen Finger und zieht das Ende mit der Schraubenmutter möglichst weit weg. Lässt man die Schraubenmutter dann los, rotiert sie immer schneller am Faden um den Finger und das Gewicht fällt nicht zu Boden.



Abb. 17: Die Zündholzschachtel pendelt um den Finger

Physikalischer Hintergrund:

Die Schraubenmutter verhält sich beim Loslassen wie ein Fadenpendel, dessen Schwingungsdauer von der Pendellänge abhängig ist. Da das Gewichtsstück auf Grund der Gravitation nach unten gezogen wird, verkürzt sich dadurch die Pendellänge der Schraubenmutter und die Schwingungsdauer wird kürzer. Die kinetische Energie des Pendels ist so groß, dass es volle Kreisbewegungen durchführen kann. Der Faden wickelt sich also um den Finger.

Der Fall des Gewichtstücks stoppt je nach Art des Fadens schon nach drei Umläufen der Schraubenmutter durch Reibung des Fadens am Finger.

2.3 Gedämpfte Schwingung

Alle in der Natur vorkommenden Schwingungen klingen mit der Zeit auf Grund von Reibungsverlusten ab, wenn man nicht in geeigneter Weise Energie dem System zuführt. Schwingungen, deren Amplituden mit der Zeit abnehmen, nennt man gedämpft. Je nachdem wie stark das System gedämpft ist, unterscheidet man zwei Typen von Bewegungen: periodische und aperiodische Bewegungen.

Bei einer periodischen Bewegung ist die Dämpfung nicht allzu groß. Der Körper schwingt, jedoch wird die Amplitude langsam kleiner. Durch Variation der Dämpfung kann man ein mehr oder weniger schnelles Abklingen der Schwingung erreichen.

Dämpfung

Material:

- Feder
- Gewicht
- Stativstange
- Großes Glas mit Wasser, in welches das Federpendel passt



Abb. 18: Federpendel in Luft

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt das Gewicht an einem Ende der Feder. Das Federpendel hängt man dann auf die Stativstange. Wenn man dann die Feder auslenkt, schwingt das Gewicht auf und ab, bis es nach einer Zeit zur Ruhe kommt. Gibt man dann das Glas Wasser unter das Federpendel und lässt es dann schwingen, wird es viel stärker abgebremst und kommt viel früher zum Stillstand.

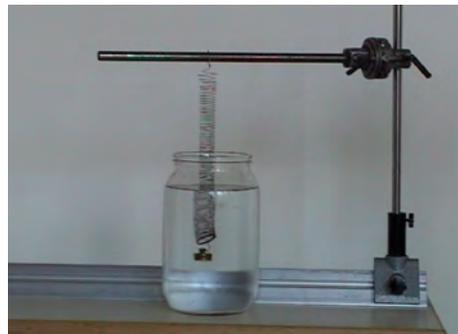


Abb. 19: Federpendel im Wasser

Physikalischer Hintergrund:

Im Wasser sind die Moleküle viel dichter beieinander als in der Luft. Deswegen ist die Reibung viel größer. Das Federpendel wird dadurch stärker gedämpft als in der Luft und kommt schneller zur Ruhe. Die Dämpfung ist beinahe so groß, dass man fast keine Periodizität erkennen kann.

Bewegungen, bei denen der Körper nach bloßem Loslassen aus einer Auslenkung gerade die Ruhelage erreicht, ohne darüber hinaus zu gehen, nennt man aperiodische Bewegungen.

Von besonderer Wichtigkeit ist der Grenzfall jener aperiodischen Bewegung der geringsten Dämpfung, bei der der Körper in kürzester Zeit zur Ruhe kommt (aperiodischer Grenzfall). Der aperiodische Grenzfall wird z. B. bei Stoßdämpfern von Autos oder bei Zeigern von Analog- Messgeräten ausgenutzt. Verstärkt man diese Dämpfung, kommt der Körper zunehmend langsamer in die Ruhelage (Kriechfall).

2.4 Erzwungene Schwingung

Erzwungene Schwingung:

Material:

- Schnur
- Gewicht
- Stativstange
- Zwei Gummiringel



Abb. 20: Erzwungene Schwingung

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt das Gewicht an einem Ende der Schnur und legt sie über eine waagrechte Stativstange. Um eine „falsche“ Bewegung zu unterbinden befestigt man an der Stange die zwei Gummiringerl links und rechts von der Schnur, um sie gut führen zu können. Während man das Ende der Schnur, an dem kein Gewicht hängt, in einer Hand hält, lenkt man das Gewicht aus und lässt es wie ein Fadenpendel schwingen. Wenn man dann beim Durchgang durch den tiefsten Punkt am Seil zieht und beim Maximalausschlag wieder nachlässt, kann man die Amplitude konstant halten bzw. sogar anwachsen lassen.

Physikalischer Hintergrund:

Bei einer erzwungenen Schwingung wird eine gedämpfte Schwingung durch eine periodische Störkraft angeregt. Man bezeichnet das schwingungsfähige System als Resonator und die periodisch wirkende Störkraft als Erreger. Nach einer gewissen Einschwingzeit schwingt das System im Wesentlichen ungedämpft mit der Frequenz des Erregers.

Wenn das Gewicht den tiefsten Punkt erreicht, wirkt in Richtung der Schnur eine große Zentripetalkraft und beinahe das gesamte Gewicht des Körpers. Wenn man dann an der Schnur zieht, erhöht man durch Arbeit die Energie des Systems. Gibt man am höchsten Punkt mit der Schnur wieder nach, wird Energie wieder an die Umgebung abgegeben. Da an diesem Punkt vorwiegend die Gewichtskraft wirkt, geht nicht die gesamte, zuvor „gewonnene“ Energie, an die Umgebung ab, sondern nur ein Teil.

Während einer Periode geschieht dieser Vorgang zwei Mal (auf jeder Seite einmal), sodass die Frequenz der Anregung doppelt so groß ist wie die Eigenfrequenz des Systems.

Die erzwungene Schwingung hat nach der Einschwingzeit eine konstante Amplitude und ist, wenn die Störkraft harmonisch ist, harmonisch. Bei einer bestimmten Frequenz des Resonators ist die Amplitude der erzwungenen Schwingung maximal, man spricht von Resonanz zwischen Erreger und Resonator. Je größer die Dämpfung ist, desto kleiner ist die Resonanzfrequenz. Geht man von einem reibungsfreien System aus, kommt es zur sog. Resonanzkatastrophe.

Resonator

Material:

- Stimmgabel
- Holztisch



Abb. 21: Anschlagen der Stimmgabel

Aufbau und Durchführung:

Man schlägt eine Stimmgabel an und beobachtet wie laut und wie lange sie ertönt. Dann schlägt man sie wieder an und setzt ihr unteres Ende auf die Tischplatte. Dabei ist der Ton lauter und klingt früher ab.

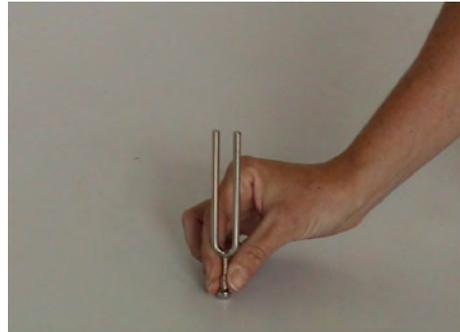


Abb. 22: Der Tisch als Resonator

Physikalischer Hintergrund:

Beim Aufsetzen der Stimmgabel wird der ganze Tisch angeregt. Die Moleküle des Tisches schwingen mit der Frequenz der Stimmgabel. Der Tisch besitzt eine wesentlich größere „Abstrahlfläche“, wobei das erzeugte Schallfeld viel größer ist als nur bei der Stimmgabel und der Ton wird lauter wahrgenommen. Jedoch wird durch die größere Fläche auch die mechanisch in der Stimmgabel gespeicherte Energie schneller in „Schallenergie“ umgewandelt. Deswegen verstummt der Ton schneller.

Resonanzkatastrophe beim Fadenpendel

Material:

- Faden (ungefähr $0,5\text{ m}$)
- Gewichtsstück (z. B. Metallkugel)
- Tischkante

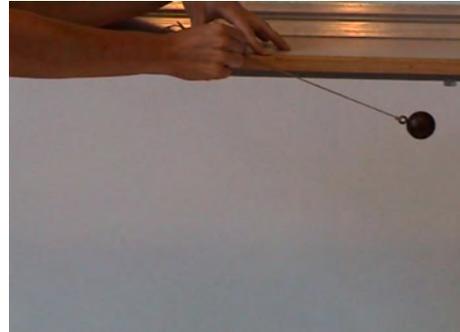


Abb. 23: Resonanzkatastrophe

Aufbau und Durchführung:

Der Faden wird mit dem einen Ende am Gewicht befestigt, sodass ein Fadenpendel entsteht. Dann hält man das andere Ende in der einen Hand und bewegt es entlang einer Tischkante zwischen Daumen und Zeigefinger der anderen Hand, wobei diese zwei Finger den maximalen Bewegungsbereich vorgeben. Diese Bewegung variiert man, indem man die Geschwindigkeit, mit der das Pendel anregt, ändert. Dabei kann man drei unterschiedliche Fälle erkennen:

- 1) Bei langsamer Bewegung schwingt das Pendel ungefähr in einem Rahmen wie meine Finger vorgeben.
- 2) Erreiche ich eine Anregung, die ungefähr der Eigenfrequenz des Pendels entspricht, schwingt das Pendel immer weiter aus (Resonanzkatastrophe)
- 3) Bewege ich meine Hand sehr schnell, so schwingt das Pendel fast gar nicht.

Physikalischer Hintergrund:

Das Fadenpendel verhält sich wie ein angeregtes, gedämpftes System. Nach einem gewissen Einschwingvorgang pendelt sich das System auf eine bestimmte Amplitude ein. Bei kleiner Frequenz der Anregung schwingt das System ungefähr mit der Amplitude der Anregung (Fall 1). Regt man das System ungefähr mit der Eigenfrequenz an, so addieren sich die jeweiligen Amplituden, und es kommt zur Resonanzkatastrophe (Fall 2). Ist die Frequenz der Anregung sehr groß, so löschen sich die Amplituden beinahe aus, das Pendel schwingt kaum mehr (Fall 3).

Der wandernde Ton

Material:

- 2 Stimmgabeln gleicher Frequenz
- Tisch



Abb. 24: Anschlagen einer der beiden Stimmgabeln

Aufbau und Durchführung:

Man hält die zwei Stimmgabeln ein paar Zentimeter voneinander entfernt. Dann schlägt man eine davon an und lässt sie nach einigen Sekunden durch Festhalten der Zinken wieder verstummen. Setzt man gleich darauf die zweite Stimmgabel mit ihrem Fuß auf die Tischplatte auf, so kann man den Ton wieder hören.



Abb. 25: Beim Festhalten schwingt die andere Stimmgabel weiter

Physikalischer Hintergrund:

Beim Anschlagen der einen Stimmgabel wird auch die umgebende Luft in Schwingung versetzt. Der Schall breitet sich aus, regt somit auch die zweite Stimmgabel an. Hat diese dieselbe Eigenfrequenz wie die erste, so kommt es zur Resonanz, und man kann den Ton hören. Durch das Aufsetzen am Tisch (Resonanzkörper) wird lediglich die Lautstärke erhöht. Hinweis: Wenn man Stimmgabeln besitzt, die bereits auf hölzernen Resonanzkörpern befestigt sind, funktioniert der Versuch besonders schön.

2.5 Überlagerung von Schwingungen

2.5.1 Parallele Schwingrichtung

Überlagerung von Schwingungen

Material:

- Laser
- Zwei Spiegel mit Blattfedern
- Weiße Wand

Aufbau und Durchführung:

Man fixiert die Spiegel mit den Blattfedern so, dass sie parallel schwingen. Dann richtet man den Laser so auf den ersten Spiegel, dass er dort reflektiert und auf den zweiten Spiegel trifft, wo er wieder reflektiert und auf die Wand geleitet wird. Wenn man dann den Raum abdunkelt und beide Spiegel in Schwingung versetzt, kann man eine Amplitude erkennen, die von den beiden einzelnen Schwingungen abweicht. Bei günstiger Einstellung kann man sogar eine Schwebung erkennen.

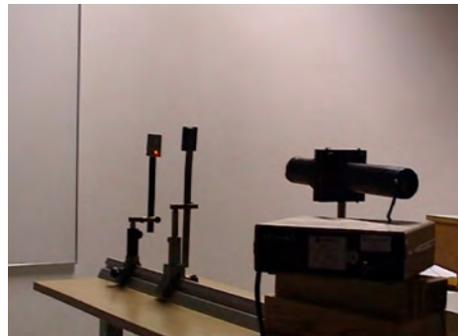


Abb. 26: Versuchsaufbau



Abb. 27: Überlagerte Schwingung

Physikalischer Hintergrund:

Bei Überlagerung addieren sich die Funktionswerte der beiden Schwingungen zu jedem Zeitpunkt. Deswegen ändert sich die resultierende Schwingung. Wenn die Spiegel genau gegenläufig mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude laufen, kommt es zu einer Auslöschung der resultierenden Schwingung. Diesen Fall kann man aber nur sehr schwer realisieren, daher erkennt man eine Veränderung der Amplitude.

2.5.1 Schwebung

Schwebung mit 2 Stimmgabeln

Material:

- Zwei Stimmgabeln mit gleicher Eigenfrequenz



Abb. 28: Anwärmen einer Stimmgabel

Aufbau und Durchführung:

Zuerst schlägt man die beiden Stimmgabeln an, und man kann die gleichen Töne hören. Wenn man eine der beiden Stimmgabeln fest in der Hand hält, sie so anwärmt und dann wieder beide Stimmgabeln anschlägt, kann man eine Schwebung hören.

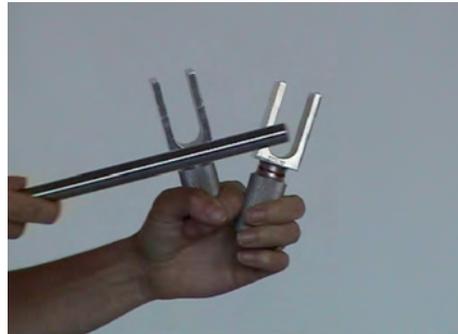


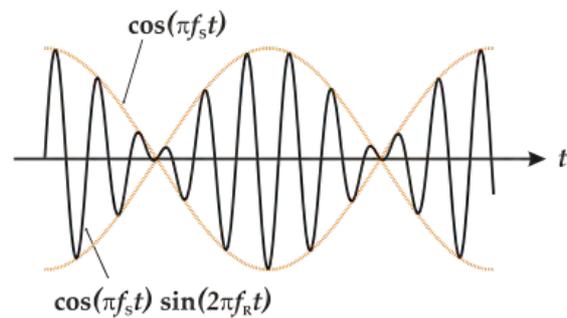
Abb. 29: Anschlagen der Stimmgabeln

Physikalischer Hintergrund:

Durch das Anwärmen der Stimmgabel verändert man ihre Frequenz. Wenn man dann die beiden Stimmgabeln anschlägt, überlagern sich die beiden Teilschwingungen, ohne sich gegenseitig zu stören. Es kommt zu einer periodischen zu- und abnehmenden Amplitude deren Frequenz gleich:

$$v_{\text{Schwebung}} = v_1 - v_2 \quad (6)$$

ist.



Grafik 2: Schwebung⁴

Die schwarze Funktion zeigt die Amplitude der Überlagerung in Abhängigkeit von der Zeit und die Einhüllende die Schwebungsfunktion als Funktion der Zeit

Haben bei Überlagerung zweier Schwingungen die jeweiligen Kreisfrequenzen ein rationales Verhältnis zueinander, kommt es wieder zu einer periodischen Bewegung, die jedoch nicht mehr harmonisch ist. Ein besonderer Fall einer solchen Bewegung ist die Schwebung, bei der die Amplitude periodisch zu- und abnimmt. Sie entsteht, wenn die jeweiligen Amplituden gleich groß sind und sich die Frequenzen der überlagerten Schwingungen kaum unterscheiden. Damit ist die momentane Amplitude von der Zeit abhängig und ihr Maximalwert beträgt $2x_0$. Eine Periode ist durch zwei aufeinander folgende maximale Amplituden gegeben, wobei man die Zeit, die während einer Periode vergeht, als Schwebungsdauer τ bezeichnet. Die Schwebungsfrequenz ist gleich der Differenz der Frequenzen der überlagerten Schwingungen.

⁴ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwebung>

2.5.3 Schwingungsrichtungen senkrecht zueinander

Lissajoussche Figuren

Material:

- Laser
- Zwei Spiegel mit Blattfedern
- Stativstangen
- Weiße Wand



Abb. 30: Versuchsaufbau

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt die Spiegel mit den Blattfedern so, dass eine senkrecht und die andere waagrecht schwingt. Dann richtet man den Laser so aus, dass der Strahl auf einen Spiegel trifft, dort reflektiert und auf den anderen Spiegel gelenkt wird, wo er wieder reflektiert und an die Wand projiziert wird. Wenn man dann die beiden Spiegel in Schwingung versetzt und den Raum verdunkelt, kann man an der Wand sog. Lissajous-Figuren erkennen, die immer kleiner werden.



Abb. 31: Überlagerte Schwingung, Teilbereich (Momentaufnahme)

Physikalischer Hintergrund:

Mit den Spiegeln erzeugt man ebene Schwingungen, die an der Wand überlagert werden und so die zweidimensionalen Figuren entstehen lassen. Um derartige Gebilde erzeugen zu können, müssen die Schwingungsrichtungen senkrecht aufeinander stehen. Die Schwingungen der Spiegel werden auf Grund der Dämpfung immer mehr und mehr abgeschwächt und die Figuren werden immer kleiner bis nur mehr der Punkt des Lasers sichtbar ist.

2.6 Gekoppelte Schwingungen

Die schwingenden Wäscheklammern

Material:

- 2 Wäscheklammern
- Rexgummiring
- 2 Stativstangen

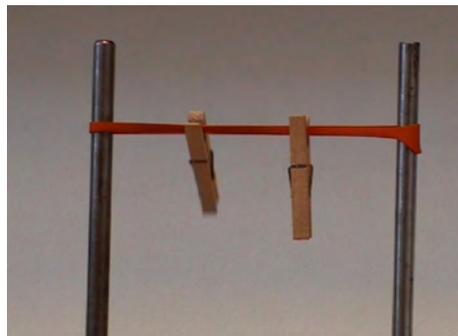


Abb. 32: Gekoppeltes Pendel

Aufbau und Durchführung:

Den Rexgummiring spannt man zwischen die Stativstangen und befestigt die Wäscheklammern daran (Abstand ungefähr 5 cm). Dann lenkt man eine Wäscheklammer aus ihrer Ruhelage aus (Drehung nach oben) und lässt sie los. Sie schwingt. Schon bald darauf beginnt die zweite Wäscheklammer auch zu schwingen. Während die Amplitude der zweiten Wäscheklammer immer größer wird, wird die der ersten immer kleiner bis sie Null wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Amplitude der zweiten Wäscheklammer maximal. Der Vorgang dreht sich um und die Schwingung „wandert“ wieder zurück.

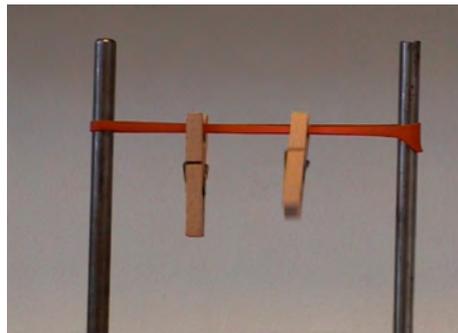


Abb. 33: Gekoppeltes Pendel

Physikalischer Hintergrund:

Durch den Rexgummi sind die beiden Wäscheklammern, die ohne Kopplung die gleiche Eigenfrequenz haben, verbunden. Beim Auslenken bzw. Schwingen der ersten Wäscheklammer wird auch der Gummi mitgedreht. Das setzt sich zur zweiten Wäscheklammer fort und lenkt diese aus bzw. bringt diese zum Schwingen. Wenn die erste Wäscheklammer still steht, ist die gesamte Energie der Bewegung in die zweite übergegangen. Es herrscht eine analoge Situation wie zu Beginn.

Wilberforce- Pendel

Material:

- Stativstange
- Gekoppeltes Längs- und Drehpendel
- Gewicht

Aufbau und Durchführung:

Man hängt das Wilberforce- Pendel an der Stativstange auf. Lenkt man dann die Feder nach unten aus, so schwingt das Pendel auf und ab. Nach und nach kommt eine Drehbewegung dazu, die immer stärker wird, während die Längsbewegung immer kleiner wird. Ist die Drehbewegung maximal, kann man fast keine Auf- und Abbewegung mehr erkennen. Dann wird die Drehbewegung wieder geringer und die Längsbewegung nimmt wieder zu. Ist die Längsbewegung maximal, so dreht sich das Pendel nicht. Man kann einen ständigen Übergang von Dreh- in Längsbewegung und umgekehrt erkennen.



Abb. 34: Wilberforce- Pendel

Physikalischer Hintergrund:

Beim Wilberforce- Pendel handelt es sich um ein gekoppeltes System einer Dreh- und einer Längsbewegung. Die Eigenfrequenzen der Längs- und der Drehschwingung sind annähernd gleich. Da das System gekoppelt ist, kann keine der beiden Schwingungsformen allein vorkommen. Lenkt man das Pendel aus, wird die Energie der angeregten Schwingungsform auf die andere übertragen bis sie dort vollkommen gespeichert ist. Dann regt diese wieder die andere Schwingungsform an, und die Energie wandert wieder zurück. Diese Energieübertragungen werden durch die Kopplung wiederholt.

Zwei Kugeln in einem Uhrglas

Material:

- Uhrglas
- Zwei Metallkugeln unterschiedlicher Größe

Aufbau und Durchführung:

Man stellt das Uhrglas auf einen Tisch und legt die größere Kugel in das Glas, sodass sie in der Mitte ruhig liegt. Dann gibt man die zweite Kugel so dazu, dass sie im oberen Teil des Uhrglases auf einer Kreisbahn zu rollen beginnt. Die kleine Kugel rollt immer weiter Richtung Mitte, während sich die große Kugel auch zu bewegen beginnt. Je weiter die kleine Kugel Richtung Mitte kommt, desto stärker wird die Kreisbewegung der größeren Kugel bis die kleine Kugel in der Mitte liegt und die größere rollt. Dann wandert die große Kugel wieder weiter zur Mitte und die kleine beginnt sich wieder zu bewegen. Es passiert wieder der gleiche Effekt.

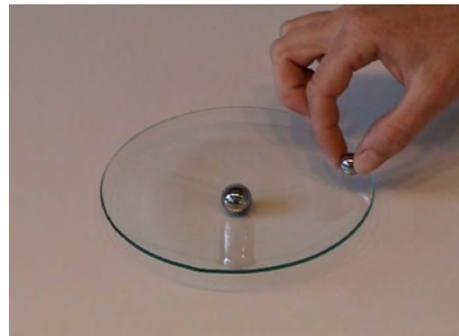


Abb. 35: Zweite Kugel in die Schale rollen lassen

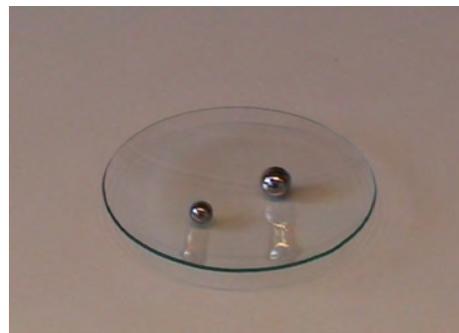


Abb. 36: Beide Kugeln rollen in der Petrischale

Physikalischer Hintergrund:

Durch die Form des Uhrglases bewegt es sich beim Rollen der Kugeln ein bisschen mit. Wenn man zu Beginn die kleine Kugel rollen lässt, überträgt sich die Bewegung des Uhrglases auf die große Kugel und sie beginnt zu rollen. Da beide Kugeln gleichzeitig im Uhrglas sind, handelt es sich also um ein gekoppeltes System, in dem die Energie über das Uhrglas von einer zur anderen Kugel übertragen wird und als Rollen sichtbar ist.

Zusätzlich wirkt immer Reibungskraft, die die Bewegungen nach und nach abbremst, bis beide Kugeln in der Mitte ruhen.

2.7 Eigenschwingungen

2.7.1 Eigenschwingungen von linearen Festkörpern und Flüssigkeits- bzw. Gassäulen

Lineare Systeme kann man sich idealisiert als eine Kette von gekoppelten „Elementarpendeln“ vorstellen. Die Schwingungen dieser „Elementarpendel“ lassen sich in Transversalschwingungen (Schwingungen, die normal zur Längsachse des Systems sind) und Longitudinalschwingungen (Schwingungen, die parallel zur Längsachse sind) unterscheiden. Im idealisierten Fall hängt man n Pendel aneinander. Betrachtet man den Grenzfall, in dem $n \rightarrow \infty$ geht, erhält man die Eigenschwingungsformen realer linearer Systeme, z. B. Seil- oder Saitenschwingungen. Jede Eigenschwingung zeichnet sich mit einer bestimmten Anzahl von Bewegungsknoten (Orte ohne Bewegung) und Bewegungsbäuchen (Orte maximaler Bewegung) aus.

Flaschenpfeife:

Material:

- Glasflasche
- Wasser



Abb. 37: Blasen an der Flaschenöffnung

Aufbau und Durchführung:

Die Flasche befüllt man zum Teil mit Wasser. Wenn man dann schräg in die Flaschenöffnung hinein bläst, kann man einen Ton hören. Füllt man immer mehr Wasser in die Flasche, so wird der Ton höher.



Abb. 38: Wasser auffüllen

Physikalischer Hintergrund:

Wenn man in die Flasche bläst, regt man dabei die Luftsäule zwischen Wasseroberfläche und Öffnung zum Schwingen an. An der Öffnung bilden sich auf der Seite in Richtung, in die man bläst Luftströme, die Druckschwankungen verursachen [4]. Die Flasche selbst dient als Resonator und macht diese Druckschwankungen hörbar (darauf wird später noch eingegangen). Da die Tonhöhe von der Länge der Luftsäule in der Flasche abhängt, nimmt die Wellenlänge λ bei steigendem Wasserspiegel ab und die Frequenz wird mit

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

c ...Schallgeschwindigkeit

größer. So ist der Ton höher.

Flaschenglocke:

Material:

- Glasflasche
- Wasser
- Löffel oder anderes Werkzeug mit dem man auf die Flasche schlagen kann

Aufbau und Durchführung:

Man befüllt die Flasche ungefähr bis zum unteren Drittel mit Wasser. Dann schlägt man die Flasche mit einem Werkzeug an und es entsteht ein Ton. Je mehr Wasser man in die Flasche füllt, desto tiefer wird der Ton.



Abb. 39: Anschlagen der Flasche

Physikalischer Hintergrund:

Durch das Anschlagen mit dem Werkzeug regt man das Wasser in der Flasche zum Schwingen an. Da die Eigenfrequenz des Wassers von der Masse bzw. von der Höhe des Wasserspiegels abhängt, wird die Wellenlänge λ mit steigendem Wasserspiegel größer und die Frequenz nimmt wegen (7) ab und der Ton wird tiefer.

Die Schwingung einer Stimmgabel

Material:

- Stimmgabel
- Overheadprojektor
- Durchsichtige Plexiglaswanne
- Wasser

Aufbau und Durchführung:

Man füllt die Wanne mit Wasser und stellt das Ganze auf den Overheadprojektor. Dann schlägt man die Stimmgabel an und hält sie so ins Wasser, dass die Zinken gerade ins Wasser tauchen. Das Wasser spritzt weg, und man kann ein paar Wellen erkennen.

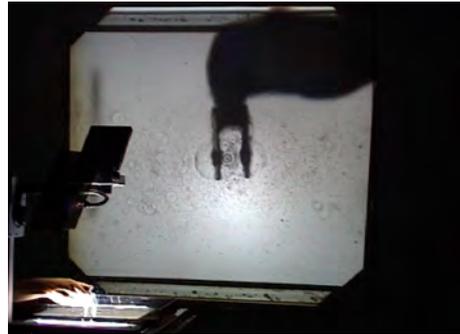


Abb. 40: Schwingungen der Stimmgabel

Physikalischer Hintergrund:

Beim Anschlagen der Stimmgabel werden die Zinken in Schwingung versetzt. Diese Bewegung ist allerdings so klein, dass man sie mit bloßem Auge nicht erkennen kann. Deswegen halten wir die Zinken in unserem Versuch ins Wasser, denn die Schwingungen werden auf das Wasser übertragen, und es entstehen Wellen.

Genau wie im Wasser werden diese Schwingungen auch an die Luft übertragen, pflanzen sich dort fort, und man kann einen Ton hören.

2.7.2 Eigenschwingungen von Flächen und Körpern

Chladnische Klangfiguren

Material:

- Dünne Metallplatte, die in der Mitte ein Loch hat
- Metallstab mit einem Gewinde an einem Ende
- Schraubenmutter, die zum Gewinden des Stabes passt
- Halterung zum Befestigen des Stabes
- Geigenbogen
- Harz oder Kolophonium
- Sand



Abb. 41: Chladnische Klangfigur

Aufbau und Durchführung:

Man schraubt den Stab mit dem Gewinde mit Hilfe der Schraubenmuttern an der Metallplatte fest. Den Stab befestigt man mit einer Halterung, sodass er senkrecht nach oben steht und die Platte waagrecht ist. Dann streut man Sand auf die Platte und harzt den Geigenbogen ein. Wenn man mit dem Bogen am Rand der Platte einlang streicht, entsteht eine Figur. Durch Variation der Stelle, an der man streicht, oder wenn man die Platte an verschiedenen Stellen mit einem Finger fest berührt, kann man unterschiedliche Sandfiguren erzeugen.



Abb. 42: Chladnische Klangfigur

Physikalischer Hintergrund:

Durch das Einharzen des Geigenbogens bleibt der Bogen während des Streichens an der Platte haften, und sie biegt sich mit der Bewegung des Bogens mit. Ist die Spannung groß genug, so wird die resultierende Kraft größer als die Haftreibung zwischen dem Bogen und der Platte, und die Platte bewegt sich in die entgegengesetzte Richtung. Hat die Platte so die Ruhelage durchquert, dreht sich die Richtung, nachdem sie auf Grund der Reibung zum Stillstand gekommen ist, wieder um. Die Platte wird durch die Reibungskraft wieder beschleunigt.

Am Berührungspunkt des Geigenbogens wird die Platte also zu einer Schwingung angeregt. Bei zweidimensionalen Körpern, wie diese Platte, entstehen nicht Knotenpunkte, sondern Linien an denen keine Bewegung stattfinden. Diese Linien nennt man Knotenlinien. Je nach Art der Platte sind die Eigenschwingungen unterschiedlich, denn sie sind unter anderem von Größe, Dicke, Ort der Anregung und Temperatur abhängig.

Der auf die Platte gestreute Sand bleibt an den Linien geringster Bewegung liegen und es entstehen die charakteristischen Figuren.

Wenn man an einer Stelle die Metallplatte berührt, so dämpft man dort die Schwingung. Am Anstreichpunkt entsteht ein Maximum der Bewegung, und der Sand wird weggeschleudert. An den Dämpfungspunkten hingegen ist kaum Bewegung vorhanden, und der Sand bleibt liegen.

3 Wellen

3.1 Grundsätzliches

Eine fortschreitende Welle ist im Wesentlichen die Fortpflanzung einer Zustandsänderung (z. B. einer Deformation bzw. Auslenkung einer Druckänderung) und entsteht dann, wenn in einem „kopplungsfähigen“ System eine Störung auftritt. Die bei der Störung zugeführte Energie wird dann ohne Materientransport weitergeleitet.

Seilwelle

Material:

- Seil oder „Gummischnur“

Aufbau und Durchführung:

Man spannt das Seil bzw. die Gummischnur und schlägt an einem Ende kurz mit der Hand auf das Seil bzw. die Schnur. Es entsteht eine fortlaufende Welle.



Abb. 43: Fortschreiten der Welle

Physikalischer Hintergrund:

Zur Veranschaulichung kann man ein Modell einer Kette aus elastisch aneinander gekoppelten Massenpunkten („Elementarpendel“) verwenden.

Meist handelt es sich bei der Störung um eine periodische, und zwar um eine harmonische Schwingung (z. B. nach $x_1 = x_0 \cdot \sin(\omega t)$) wie in (4), die das erste Elementarpendel anregt. Durch die Koppelung der Elementarpendel wird die Bewegung mit einer zeitlichen Versetzung bzw. Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ auf das zweite Pendel weitergeleitet.

$$x_2 = x_0 \cdot \sin(\omega t - \Delta\varphi) \quad (8)$$

Dann wird diese Bewegung auf das dritte Pendel weitergeleitet usw. Somit kommt es zur Entstehung von laufenden „Bergen“ und „Tälern“, also zu einer periodisch, fortschreitenden Transversalwelle.

Jedes Elementarpendel hat die gleiche periodische Bewegung, schwingt also mit einer Periodendauer τ . Diese Schwingungen sind zueinander nur zeitlich versetzt. Der dabei entstehende räumliche Verlauf dieser Versetzungen der Auslenkungen ist ebenfalls periodisch. Die räumliche Periode nennt man Wellenlänge λ . Betrachtet man diese räumliche Periode entlang der Fortpflanzungsrichtung z , so ist nach einer Zeit $\Delta t = \tau$ wieder dieselbe Phase bzw. Auslenkung in einem Mindestabstand $\Delta z = \lambda$ vorhanden. Das Fortschreiten der räumlichen Bewegung geschieht mit der Phasengeschwindigkeit:

$$c = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\tau} \quad (9)$$

Im letzten Versuch war die Auslenkung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Es handelt sich dabei um eine Transversalwelle. Da sich die einzelnen Elementarpendel noch dazu in einer zeitlich konstanten Ebene bewegen, nennt man eine solche Welle linear polarisiert.

3.2 Verschiedene Arten von Wellen

3.2.1 Elastische Wellen im Festkörper

Transversalwellen:

Wie bei der Seilwelle beschrieben, sind Transversalwellen dadurch charakterisiert, dass die Auslenkungen in einer zeitlich konstanten Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen.

Torsionswelle:

Material:

- Faden (ungefähr 1 m lang)
- Einige gleiche Wäschekluppen
- Stativstange

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt das eine Ende des Fadens an der Stativstange und lässt ihn hinunter hängen. Die Wäschekluppen zwickt man in ungefähr konstanten Abständen an den Faden. Dann spannt man den Faden stark und lenkt die erste oder die letzte Wäscheklampe aus, indem man sie in eine Richtung dreht. Man kann eine fortschreitende Welle sehen, die sich spiralförmig entlang des Fadens bewegt.

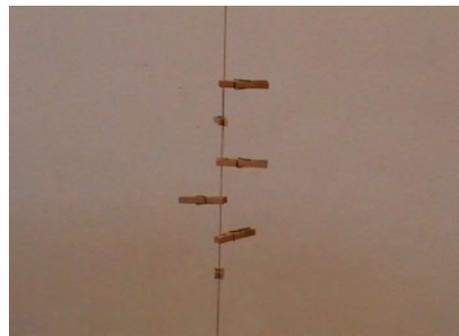


Abb. 44: Darstellung einer Torsionswelle mit Wäscheklammern

Physikalischer Hintergrund:

Durch die Auslenkung einer Kluppe verdreht man den Faden. Es entsteht eine rücktreibende Kraft, die den Faden und somit die Wäscheklammer zurückdreht. Wie beim gekoppelten Pendel setzt sich diese Bewegung entlang des Fadens fort. Die einzelnen Wäscheklammern führen Drehschwingungen aus.

Bei Torsionswellen breitet sich eine Drehschwingung aus. Die Elementarpendel bewegen sich mit Kreisschwingungen auf einer zur Fortpflanzungsrichtung senkrechten Ebene.

Longitudinalwellen- Modelle

Material:

- Overheadprojektor
- Folie mit Spalt
- Folie mit einer Sinuskurve

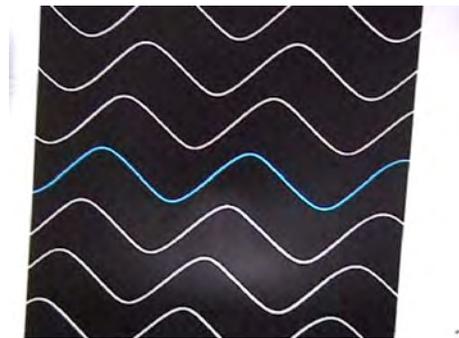


Abb. 45: Erste Wellenfolie

Aufbau und Durchführung:

Man legt die Folie mit dem Spalt auf den Overheadprojektor. Dann legt man die zweite Folie darüber und zieht die Sinuskurve über den Spalt. Dabei bewegt sich ein Punkt entlang des Spalts.

In der Projektion sieht man dann nur einen (oder mehrere) Punkt(e), die eine longitudinale Bewegung ausführen.



Abb. 46: Projektion einer Welle



Abb. 47: Zweite Wellenfolie

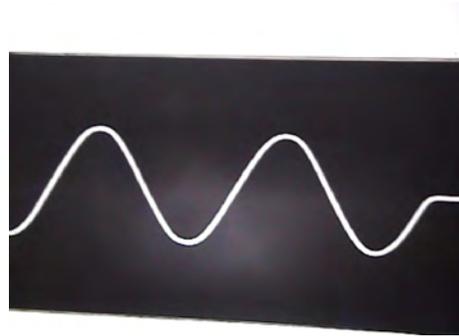


Abb. 48: Dritte Wellenfolie

Material:

- Magic Role (flexible Kunststoffspirale)
- Tisch
- Versuchsperson

Aufbau und Durchführung:

Man legt das Magic Role auf den Tisch und lässt es an einem Ende von einer Testperson festhalten. Wenn man dann an der anderen Seite periodisch anzieht, kann man das Fortpflanzen einer Dichtewelle erkennen.



Abb. 49: Ziehen an der Spirale

Physikalischer Hintergrund:

Ganz ähnlich wie zuvor bei der Transversalwelle, entsteht eine solche Welle durch eine (periodische) Störung des Systems. Jedoch ist hier die Auslenkung parallel oder antiparallel zur Ausbreitungsrichtung, was durch die Modelle veranschaulicht wird.

3.2.2 Dichtewellen in Flüssigkeiten und Gasen

Da in Flüssigkeiten und Gasen keine Scherkräfte übertragbar sind, lassen sich nur Longitudinalwellen und keine Transversalwellen erzeugen. Diese Longitudinalwellen stellen fortschreitende Dichteschwankungen dar (so auch in Festkörpern). Man nennt diese Dichtewellen Schallwellen. Die Dichteschwankungen sind proportional zu Druckschwankungen, und die maximale Abweichung vom Ruhedruck Δp_0 heißt Druckamplitude. Wie auch bei einer Transversalwelle pflanzt sich dieser Druck- bzw. Dichteverlauf in eine Richtung, ich nenne sie z- Richtung, mit einer charakteristischen Phasengeschwindigkeit c fort. Kommen die Zonen niedrigen und hohen Drucks bei einem Empfänger an, bringt die Welle den Empfänger mit ihrer Frequenz zum Mitschwingen. Genau das passiert auch beim Hören. Das menschliche Ohr kann Frequenzen von ca. 16 Hz bis 20 kHz wahrnehmen. Die Grenzen sind allerdings nicht bei jedem Menschen gleich. Schallwellen mit einer Frequenz über 20 kHz nennt man Ultraschallwellen.

Das schwingende Lineal

Material:

- Biegsames Lineal
- Tisch

Aufbau und Durchführung:

Man positioniert das Lineal so auf den Tisch, dass es weit über die Tischkante hinaus ragt und drückt es an einem Ende fest auf die Tischplatte. Dann lenkt man das Lineal aus. Es beginnt zu schwingen und ein Ton wird hörbar. Durch Ausprobieren kann man zwei Effekte erkennen: Zieht man das Lineal weiter in den Tisch hinein, so wird der Ton höher und er ist umso lauter, je größer man das Lineal auslenkt.



Abb. 50: Auslenkung bei großer Länge



Abb. 51: Auslenkung bei kleinerer Länge

Physikalischer Hintergrund:

Beim Schwingen des Lineals wird die umgebende Luft angeregt. Es entstehen Druckschwankungen, die sich als Schallwellen fortpflanzen. Diese können vom Ohr wahrgenommen werden, und man hört einen Ton. Zieht man das Lineal weiter in den Tisch, so wird die Länge des schwingenden Teils kürzer und die Frequenz dadurch größer und der Ton wird höher. Lässt man die Länge gleich und variiert die Auslenkung, so verändert man die Amplitude der Schwingung, deswegen ist der Ton unterschiedlich laut.

Musikbox

Material:

- Kleine Schachtel aus Karton
- Schere
- Gummiringerl, die über die Schachtel passen

Aufbau und Durchführung:

Man schneidet eine Seite der Schachtel aus, sodass diese Seite offen ist. Dann spannt man die Gummiringerl so über die Schachtel, dass sie quer über die leere Seite laufen.

Wenn man dann an den einzelnen Gummiringerl zupft, kann man Töne hören.

Physikalischer Hintergrund:

Durch das Anzupfen der Gummiringerl wird die Luft im Inneren der Schachtel in Schwingung versetzt. Je fester die Gummiringerl gespannt sind, desto größer ist die Frequenz. Die Schachtel selbst ist ein Resonanzkörper, und man kann die Schallwellen hören.



Abb. 52: Zupfen an einem Gummiringerl

Schall geht über die Zähne

Material:

- Bleistift
- Schnur (ungefähr 1 m lang)

Aufbau und Durchführung:

Das eine Ende der Schnur bindet man um die Mitte des Bleistifts fest. Dann nimmt man den Bleistift zwischen die Zähne, und spannt die Schnur mit einer Hand. Wenn man dann mit der anderen Hand an der Schnur zupft, kann man einen Ton hören. Die Tonhöhe lässt sich durch Verändern der Spannstärke variieren.



Abb. 53: Zupfen an der Schnur

Physikalischer Hintergrund:

Durch das Zupfen am Faden wird dieser in Schwingung versetzt. Die Bewegung wird auf den Bleistift und auf die Zähne übertragen. Die Zähne sind fest mit den Knochen des Kopfes verbunden und können so die Schallwellen direkt ans Ohr weiterleiten, wo man sie dann wahrnimmt und einen Ton hört.

Durch festeres Spannen wird die Frequenz der Schwingung größer, und der Ton wird höher.

Meeresrauschen mit dem Plastikbecher

Material:

- Plastikbecher oder Blechdose
- Karton oder stärkeres Papier
(ungefähr 20 cm x 20 cm)

Aufbau und Durchführung:

In den Boden der Dose macht man ein Loch mit einem Durchmesser von ca. 5 mm. Dann geht man in einen ruhigen Raum und hält die Dose mit einer Hand so zum Ohr, dass das Loch bei der Ohrmuschel ist. Mit der anderen Hand hält man den Karton zur offenen Seite der Dose. Je nach Entfernung des Kartons kann man unterschiedlich hohes, schwaches Rauschen hören, das einem Meeresrauschen ähnelt.



Abb. 54: Hören an der Dose

Physikalischer Hintergrund:

In jedem Raum befindet sich Luft, die Schall übertragen kann, auch wenn er für einen Menschen nicht hörbar ist. Immer wieder kommt es zu Störungen, oder es entstehen Wirbel, die Schall erzeugen. Diesen Schall können wir Menschen jedoch nicht wahrnehmen. Im Versuch wirkt man dem entgegen, indem der Schall die Luft zwischen dem Boden der Dose und dem Karton durch Resonanz in Schwingung versetzt und somit hörbar macht. Es entsteht eine Luftsäule zwischen Dose und Karton. Da diese nicht rundherum geschlossen ist, können sehr viele Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen resonant angeregt werden. Diese vielen unterschiedlichen Frequenzen erzeugen nicht einen einzigen oder mehrere Töne, sondern werden als Rauschen wahrgenommen. Variiert man die Entfernung von Dose und Karton, so werden unterschiedliche Frequenzbereiche angeregt, und das Rauschen verändert seine „Tonlage“, d. h. bei größerer Entfernung ertönt das Rauschen tiefer. Nach [4]

Richtungshören

Material:

- Schlauch (ungefähr 80 cm)
- Versuchsperson



Abb. 55: Klopfen am Schlauch rechts

Aufbau und Durchführung:

Die Versuchsperson hält die Enden des Schlauches an beide Ohren, sodass der Schlauch am Rücken vorbei geht. Dann klopft man einmal in der Mitte, einmal rechts und einmal links auf den Schlauch. Die Versuchsperson kann jeweils hören, wo bzw. auf welcher Seite der Anschlag war. Sie kann sogar von zwei Schlägen, die beide auf zwei verschiedenen Stellen einer Seite angesetzt wurden, unterscheiden, welcher davon näher am Ohr war.



Abb. 56: Klopfen am Schlauch links

Physikalischer Hintergrund:

Wenn man auf den Schlauch klopft, breitet sich im Inneren eine Schallwelle aus, die dann zum Ohr gelangt. Klopft man auf die Mitte, so sind beide Ohren gleich weit entfernt, und der Schall erreicht beide Ohren zur gleichen Zeit. Die Person vermutet, dass der Schlag in der Mitte war. Wird auf einer Seite auf den Schlauch geklopft, so ergibt sich in Folge der unterschiedlichen Wege, dass der Schall bei einem Ohr früher „ankommt“ als beim anderen. Diese zeitliche Differenz kann das Gehirn wahrnehmen, und die Versuchsperson weiß auf welcher Seite angeklopft wurde.

Bemerkung:

Der Mensch kann mit seinen Ohren bzw. seinem Gehirn eine Zeitdifferenz von weniger als 30 μs wahrnehmen.

Das Schnurtelefon

Material:

- 2 Plastikbecher
- Schnur (ungefähr 10 m)
- Hilfsperson



Abb. 57: Sprechen

Aufbau und Durchführung:

In beide Becher bohrt man ein Loch, durch das man die Schnur führt. Im Inneren der Becher verknotet man die Schnur. Dann entfernen sich die zwei Personen mit jeweils einem Becher so weit voneinander, dass die Schnur gespannt ist. Eine Person spricht leise in den Becher, und die zweite kann, wenn sie ihren Becher an ein Ohr hält, die andere Person hören.



Abb. 58: Hören

Physikalischer Hintergrund:

Die Luft im Plastikbecher wird durch das Sprechen in Schwingung gebracht. Diese Schwingung wird über den Boden des Bechers auf die Schnur übertragen und gelangt als fortschreitende Welle zum zweiten Plastikbecher. Dieser wird zum Resonator, sodass die zweite Person das Sprechen trotz großer Entfernung und geringer Lautstärke gut hören kann.

Weihnachtsgong:

Material:

- 2 Fäden (ungefähr 0,5 m lang)
- Kleiderbügel
- Gegenstand, mit dem man den Kleiderbügel anschlagen kann.



Abb. 59: Ausgangsposition

Aufbau und Durchführung:

Man bindet die Fäden an der Unterseite des Kleiderbügels fest und zieht sie so weit wie möglich nach außen. Dann nimmt man in jede Hand einen Faden, sodass der Kleiderbügel verkehrt hinunter hängt. Man schlägt den Kleiderbügel an oder schwingt ihn gegen eine Tischkante und hält die Fäden in die Ohren. Es ertönt ein lauter Gong.



Abb. 60: Anschlagen des Kleiderbügels

Physikalischer Hintergrund:

Durch den Anschlag am Kleiderbügel wird dieser in Schwingung versetzt. Der Schall wird über die Fäden ans Ohr weitergeleitet, wo er als Ton wahrgenommen wird.

3.3 Der Dopplereffekt bei mechanischen Wellen

Dopplereffekt mit Hilfe einer Stimmgabel

Material:

- Stimmgabel
- Starker Faden

Aufbau und Durchführung:

Man knotet den Faden am Ende der Stimmgabel fest. Dann nimmt man das andere Ende der Schnur in die Hand. Schlägt man die Stimmgabel an und schleudert die Schnur mit der Stimmgabel in einer Kreisbewegung über dem Kopf, so hört man selbst bzw. ein etwas entfernter Beobachter, dass sich während der Bewegung die Tonhöhe verändert.

Vorsicht:

Man braucht viel Platz für diesen Versuch!

Also Sicherheitsabstand halten!

Physikalischer Hintergrund:

Die Stimmgabel ändert während der Bewegung zum Beobachter relativ ihre Geschwindigkeit. Der Doppler-Effekt bewirkt so eine Veränderung der Tonhöhe beim Beobachter. Bewegt sich die Stimmgabel in Richtung des Beobachters, so wird der Ton höher wahrgenommen als der Ton der Stimmgabel, wenn sie in Ruhe ist. Bewegt sich die Stimmgabel vom Beobachter weg, klingt der Ton tiefer. Beim Bewegen der Schnur in der Kreisbahn wird die Richtung bzw. die Geschwindigkeit relativ zum Beobachter ständig geändert. Deswegen schwankt für ihn die Tonhöhe zwischen einem tiefen und einem hohen Ton.



Abb. 61: Stimmgabel schleudern

In diesem Versuch ist der Beobachter in Ruhe und die Quelle (Stimmgabel) bewegt sich. In der Luft breitet sich eine Schallwelle mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 340 m/s aus. Jeder Punkt im Abstand $\lambda = c \cdot \tau$ (Umformung von Formel (9)) von der Quelle hat die gleiche Phase wie die Senderschwingung. Da sich aber die Quelle, wenn sie in Richtung des Beobachters geht, auch mit einer bestimmten Geschwindigkeit in die gleiche Richtung wie die Schallwellen bewegt, wird der Abstand zwischen den Punkten gleicher Phase kleiner und die Wellenlänge kleiner. Es gilt:

$$v = \frac{v_0}{1 + \frac{V}{c}} \quad (10)$$

v ... Frequenz, die der Beobachter hört

v_0 ... Frequenz der Quelle (im Versuch: Stimmgabel)

V ... Betrag der Geschwindigkeit der Quelle bezüglich des Beobachters

c ... Betrag der Geschwindigkeit von Schall in der Luft

Bewegt sich die Quelle vom Beobachter weg, so wird die Wellenlänge kleiner. In der Formel (10) steht in diesem Fall statt dem Plus ein Minus.

Betrachtet man noch den Fall, dass sich der Beobachter in Richtung der Quelle mit einer Geschwindigkeit V bewegt, so kommt der Schall bei ihm mit einer Frequenz von

$$v = v_0 \left(1 + \frac{V}{c} \right) \quad (11)$$

an.

Auch hier ersetzt man das Plus durch ein Minuszeichen, wenn sich der Beobachter in die andere Richtung, also von der Quelle weg, bewegt.

3.4 Reflexion und Brechung

Wenn eine ebene Welle an eine Mediengrenze trifft, kommt es zu zwei Sachverhalten: Der eine Teil der Welle wird an der Grenze gespiegelt und läuft dann wieder zurück, und der andere Teil geht in das zweite Medium über und bewegt sich dort, wenn die Welle nicht senkrecht auf die Grenze aufgetroffen ist, mit einer veränderten Richtung fort. Im ersten Fall spricht man von Reflexion, im zweiten von Brechung.

Das Reflexionsgesetz lautet:

$$\begin{aligned} \text{Einfallswinkel } \varepsilon &= \text{Ausfallwinkel } \varepsilon' \\ \varepsilon &= \varepsilon' \end{aligned} \quad (12)$$

Die Winkel werden immer zwischen Lichtstrahl und dem Lot (Senkrechte auf die Mediengrenze in dem Punkt, auf den der Lichtstrahl fällt) gemessen.

Das Brechungsgesetz (Snellius- Gesetz) lautet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (13)$$

c_1, c_2 Phasengeschwindigkeiten der Welle in den Medien 1 und 2

α, β Winkel zwischen Strahl und Lot in den Medien 1 und 2

Reflexion am Spiegel:

Material:

- Spiegelfliese
- Lichtquelle
- Schablone, in der ein paar Spalten sind

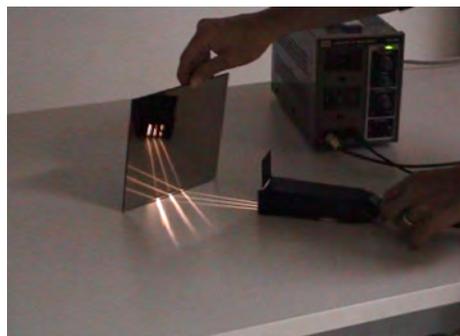


Abb. 62: Versuchsaufbau

Aufbau und Durchführung:

Man schaltet die Lichtquelle ein und gibt die Schablone vor, sodass man Lichtstrahlen sehen kann. Dann dunkelt man den Raum ab und lässt die Lichtstrahlen auf den Spiegel treffen. Diese werden reflektiert. Wenn man den Winkel verändert, in dem man die Lichtstrahlen schräg auf die Spiegelfläche fallen lässt, verändern sich die reflektierten Strahlen mit. Der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel.

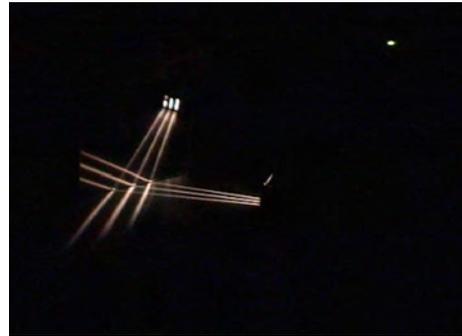
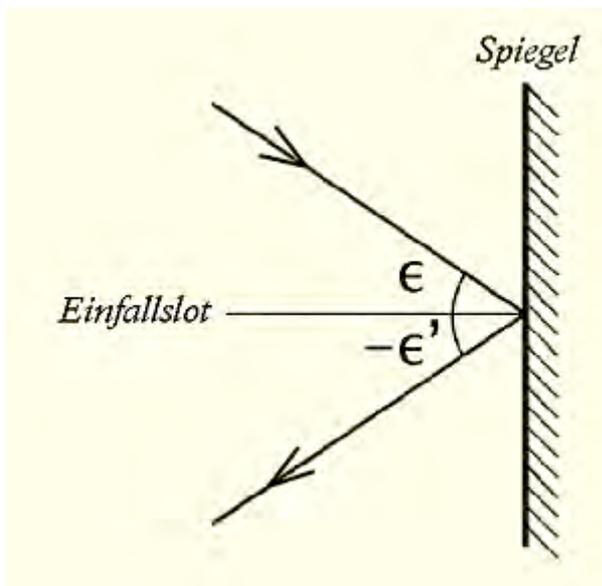


Abb. 63: Reflexion am Spiegel

Physikalischer Hintergrund:



Grafik 3⁵: Reflexion am Spiegel

Beim Auftreffen von Licht an einer Grenzschicht zweier Medien (in unserem Versuch handelt es sich um Luft und Spiegel) kommt es ganz oder teilweise zur Reflexion, wobei die Lichtstrahlen so reflektiert werden, als kämen sie von einem virtuellen Spiegelbild der Lichtquelle hinter dem Spiegel.

Es gilt das Reflexionsgesetz, also liegen der einfallende Strahl, das Lot und der reflektierte Strahl in einer Ebene. Außerdem sind Einfallswinkel und Ausfallswinkel der Lichtstrahlen gleich groß.

⁵ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausfallswinkel>

Von einem Wellenstrahl spricht man, wenn man ein sehr schmales Wellenbündel betrachtet. Trifft ein solches Wellenbündel auf eine Mediengrenze, so liegen der Wellenstrahl selbst, der reflektierte Strahl und der gebrochene Strahl in einer Ebene.

Mit Hilfe des Brechungsgesetzes kann eine eigene Stoffkonstante, die sog. Brechzahl bzw. der Brechungsindex, definiert werden. Denn es gilt:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{1,2} = \text{const} \quad (14)$$

Diese Konstante nennt man relative Brechzahl. Um aber einem einzelnen Stoff eine charakteristische Größe zuordnen zu können, definiert man die (absolute) Brechzahl:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_V}{c_2} = n_1 \quad (15)$$

Sie entsteht, wenn man den Übergang eines Strahls vom Vakuum in das betreffende Medium untersucht.

Verwendet man diese absoluten Brechzahlen beim Übergang eines Strahls von einem in ein zweites Medium, so erhält man:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (16)$$

Vergleicht man dieses Ergebnis mit der relativen Brechzahl, so kann man erkennen, dass die absolute Brechzahl des Vakuums $n_V = 1$ gesetzt wurde.

Als Hilfe kann man sich folgende Regel merken:

Beim Übergang des Lichts von einem „optisch dünneren“ Medium (kleineres n bzw. größeres c) in ein „optisch dichteres“ erfolgt eine „Brechung zum Lot“.

Für die folgenden Versuche möchte ich noch anmerken, dass die Brechzahl von Luft der vom Vakuum kaum abweicht, weshalb wir $n_{Luft} = 1$ annehmen.

Brechung

Material:

- Trinkglas
- 2 Strohhalme
- Wasser
- Öl

Aufbau und Durchführung:

Ein Trinkglas wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt, in das man anschließend die zwei Strohhalme wie ein X hineintaucht. Dann gibt man noch eine ungefähr 3 cm dicke Schicht Öl dazu. Wenn man schließlich von vorne auf das Glas schaut, sind die Strohhalme an jeder Grenze versetzt, als hätte man sie abgeschnitten und versetzt wieder hinauf gesetzt.



Abb. 64: Brechung an den Mediengrenzen

Physikalischer Hintergrund:

Die Lichtstrahlen werden an den Strohhalmen reflektiert und an den unterschiedlichen Mediengrenzen (Luft – Öl, Öl – Wasser) gebrochen. Die Erscheinung, dass die Strohhalme an den Mediengrenzen versetzt sind, entsteht auf Grund der unterschiedlichen Brechzahlen von Wasser, Luft und Öl.

Beim Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium (z. B. von Luft in Öl) tritt so eine Brechung zum Lot auf.

Totalreflexion

Material:

- Laser
- Eckiges Glas
- Seife
- Wasser

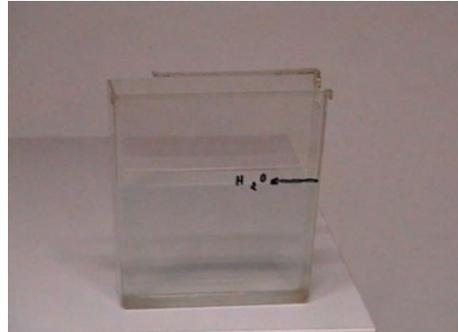


Abb. 65: Mit Wasser gefüllter Glasbehälter

Aufbau und Durchführung:

In das Glas füllt man Wasser und gibt ein bisschen Flüssigseife dazu, die man gut auflösen lässt. Dann strahlt man seitlich von unten mit dem Laser ins Glas und verdunkelt den Raum. Dabei variiert man die Winkel, mit denen man mit dem Laser einstrahlt. Man kann erkennen, dass der Strahl an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft unter manchen Winkel reflektiert und gebrochen und unter anderen nur reflektiert wird.

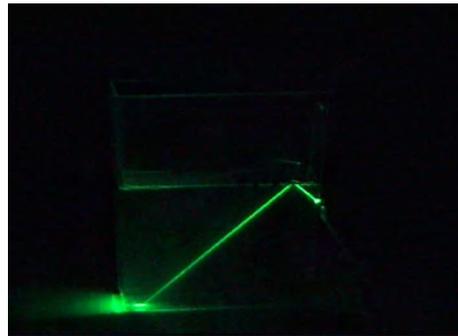


Abb. 66: Totalreflexion

Physikalischer Hintergrund:

Der Laser liefert einen Lichtstrahl mit nur einer bestimmten Wellenlänge. Dieses Licht nennt man monochromatisch, und es gelten das Reflektions- und das Brechungsgesetz. So kommt es beim Übergang an der Grenzschicht von Wasser in Luft, also von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium, zu Brechung bzw. Reflexion. Ab einem bestimmten Winkel des Strahls tritt Totalreflexion auf. Wenn man die Winkel variiert, so kann man erkennen, dass bei Winkel, die kleiner als der Winkel der Totalreflexion sind, Reflexion und Brechung gleichzeitig auftreten. Der Lichtstrahl wird also geteilt, und die jeweiligen Intensitäten sind geringer als beim ursprünglichen. Bei der Totalreflexion jedoch ist die Intensität des reflektierten Strahls ungefähr gleich wie die des einfallenden.

Wenn man monochromatisches Licht von Luft in z. B. Glas schickt, ändert sich die Farbe nicht. Das ist deswegen, weil die Frequenz einer Welle bei Reflexion und Brechung konstant bleibt.

3.4.1 Das Huygens- Fresnelsche Prinzip

Mit Hilfe des Hygens- Fresnelschen Prinzips kann man alle Erscheinungen, wie z. B. das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz, die dann auftreten, wenn eine Welle auf ein „Hindernis“ trifft, ableiten.

Das Huygenssche Prinzip besagt, dass alle Punkte einer Wellenfläche dauernd Ausgangspunkte (Sender) von Kugelwellen (sogenannten Elementarwellen) sind, die an einer Wellenfläche mit gleicher Phase „starten“. Eine Einhüllende gleichphasiger Wellenflächen dieser Elementarwellen ist jeweils eine Wellenfläche der beobachteten Welle. [3]

Elementarwellen

Material:

- Overheadprojektor
- Durchsichtige Plexiglaswanne
- Tropfpipette
- Wasser

Aufbau und Durchführung:

Man legt die Plexiglaswanne mit Wasser auf den Overheadprojektor und schaltet ihn ein. Tropft man einen Tropfen Wasser auf die Wasseroberfläche, kann man die Ausbreitung einer Kreiswelle erkennen.



Abb. 67. Elementarwellen

Physikalischer Hintergrund:

Die Kreiswelle ist ein Modell einer Elementarwelle, denn Elementarwellen breiten sich als Kugelwellen aus, die in einer Ebene wie Kreiswellen aussehen.

Das Fresnelsche Prinzip besagt darüber hinaus, dass die Wellenerregung (d. h. die Schwingung) in irgendeinem Punkt des Wellenfeldes durch Überlagerung aller dort ankommenden Elementarwellen entsteht. [3]

Wie schon zuvor erwähnt, ist beim schrägen Einfall eines Lichtstrahl auf eine Grenze der Winkel im dünneren Medium größer als im dichteren. Bei einem bestimmten Winkel β_{Grenz} im dichteren Medium ist der Winkel im dünneren Medium $\alpha = 90^\circ$.

Der Winkel β_{Grenz} wird Grenzwinkel der Totalreflexion genannt. Für ihn gilt (16), wobei $\sin \alpha = 1$, also:

$$\sin \beta_{Grenz} = \frac{n_1}{n_2} \quad (17)$$

Ist der Einfallswinkel im dichteren Medium größer als der Grenzwinkel, kommt es nur zu einer Reflexion. Dieser Fall wird Totalreflexion genannt.

Um eine ebene Welle darzustellen, kann man folgenden Versuch vorführen:

Man stellt eine durchsichtige Plexiglaswanne mit Wasser auf den Overheadprojektor und klopft gegen eine Außenwand der Wanne. Dabei entsteht eine ebene Welle.

Allerdings habe ich diesen Versuch nicht angeführt, da sich auf Grund von Reflexion an den Wänden von allen Seiten ebene Wellen fortpflanzen und somit nicht das von mir gewünschte Bild erzeugt wird.

Spiegelprisma:

Material:

- Laser
- Glasprisma (rechtwinkeliges Dreieck)
- Weißes Blatt Papier

Aufbau und Durchführung:

Man legt das Prisma auf das weiße Blatt Papier und lässt den Laserstrahl möglichst normal auf eine Kathete einfallen. Der Strahl wird an der Hypotenuse reflektiert und fällt an der anderen Kathete wieder aus.

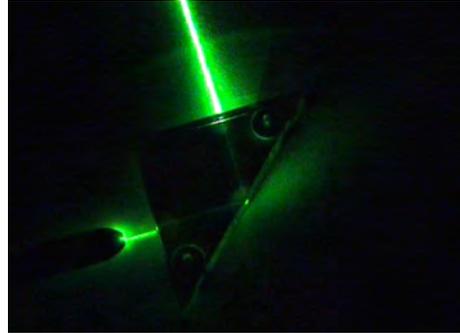


Abb. 68: Reflexion an der Hypotenuse des Prismas

Physikalischer Hintergrund:

Trifft der Laserstrahl normal auf die Kathete wird er durchgelassen und trifft so auf die Hypotenuse. Dort kommt es an der Grenzschicht von Glas zu Luft zu einer Totalreflexion, weil der Winkel 45° zum Lot beträgt und somit der Grenzwinkel, der bei der Mediengrenze Glas – Luft 43° , überschritten wird. Der reflektierte Strahl trifft dann normal auf die andere Kathete, wo er wieder durchgelassen wird. Es kommt zu einer Spiegelung des Strahls.

Umkehr- bzw. Wendepisma.

Material:

- Laser
- Glasprisma (rechtwinkeliges Dreieck)
- Weißes Blatt Papier

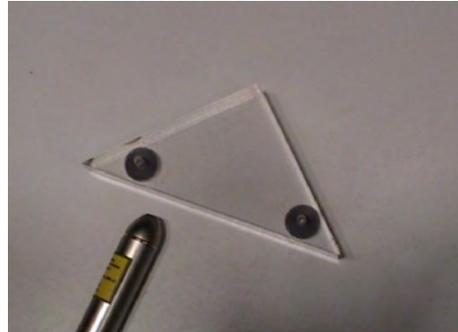


Abb. 69: Prisma und Laser

Aufbau und Durchführung:

Man legt das Prisma auf das Blatt Papier und lässt den Laserstrahl relativ normal auf die Hypotenuse des Prismas einfallen, sodass er auf eine der beiden Katheten trifft. Dabei sollte der Raum verdunkelt sein. Der Laserstrahl wird zwei Mal reflektiert (an beiden Katheten) und tritt parallel zum einfallenden aus dem Prisma aus. Fährt man dann mit dem Laser leicht auf und ab, kann man erkennen, dass sich der Lichtstrahl dabei umdreht, weil die Bewegung der „Laserstrahlen“ genau gegengleich abläuft.

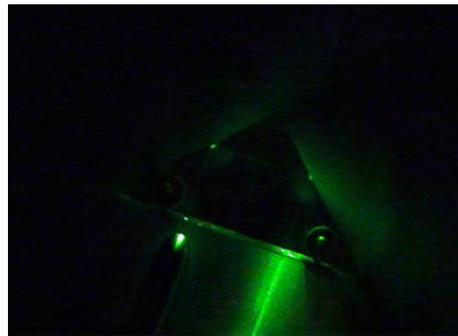


Abb. 70: "Parallele Laserstrahlen"

Physikalischer Hintergrund:

Der einfallende Laserstrahl wird an der einen Kathete total reflektiert, trifft auf die andere und wird dort ebenfalls total reflektiert. Es handelt sich also um eine doppelte Totalreflexion um jeweils 90° . Diese Totalreflexionen entstehen jeweils an der Grenzschicht von Glas zu Luft, weil der Grenzwinkel der Totalreflexion (in diesem Fall 43°) in beiden Fällen überschritten wird. So kommt es, dass der ausfallende Strahl (anti)parallel zum einfallenden verläuft und es zu einer Umkehrung kommt.

Lichtleiter:

Material:

- Glasfaser (ungefähr 0,5 m lang)
- Taschenlampe
- Stoffstück zum Abdunkeln



Abb. 71: Versuchsmaterial

Aufbau und Durchführung:

Man dunkelt den Raum ab und leuchtet mit der Taschenlampe in die Glasfaser. Den Stoff wickelt man um die Taschenlampe, damit man Licht nur in die Glasfaser gehen lässt. Wenn man dann auf die Glasfaser sieht, kann man sie leuchten sehen und am Ende sieht man einen hellen Punkt.



Abb. 72: Lichtleiter

Physikalischer Hintergrund:

Das Licht, das in die Glasfaser eindringt, wird an der Grenze zwischen Glas und Luft total reflektiert. Dieser Effekt setzt sich entlang der ganzen Glasfaser fort, bis er am Ende austritt. Dort kommt es nicht mehr zu einer Totalreflexion und es entsteht ein Lichtfleck.

Diesen Versuch kann man leicht als Freihandversuch vorzeigen:

Man bohrt im unteren Teil des Mantels einer Dose ein Loch, schneidet den oberen Teil ab und füllt sie mit Wasser. Wenn man dann mit einer Taschenlampe hinein leuchtet, ist der austretende Wasserstrahl ein Lichtleiter, da an der Grenzschicht von Wasser – Luft Totalreflexion auftritt.

Dieser Versuch ist sehr anschaulich, jedoch ist der Effekt auf Video nicht erkennbar, weshalb ich die andere Variante gewählt habe.

3.4.2 Dispersion

Ganz allgemein bedeutet Dispersion eine Abhängigkeit der Frequenz einer physikalischen Größe. Meist meint man unter Dispersion einer bestimmten Wellenart die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Frequenz in einem Medium, also: $c = c(\nu)$.

Dispersionsversuch:

Material:

- Diaprojektor
- Diapositiv mit einem Spalt zum Erzeugen eines weißen Lichtspalts
- Glasprisma
- Weiße Wand

Aufbau und Durchführung:

Man legt das Diapositiv mit dem Spalt in den Diaprojektor und schaltet ihn ein. Wenn man dann das Prisma vor den Lichtspalt hält, sodass es schräg auf eine Seitenfläche trifft, kann man in einem verdunkelten Raum ein Farbspektrum an der Wand erkennen.



Abb. 73: Dispersion

Physikalischer Hintergrund:

Trifft der Lichtstrahl auf die Grenzfläche von Luft und Glas, so wird er gebrochen. Die Brechzahl ist von der Frequenz bzw. der Wellenlänge abhängig. Bei Glas wird die Brechzahl bei zunehmender Wellenlänge kleiner. Das weiße Licht besitzt Wellen unterschiedlicher Wellenlänge, also wird der langwellige Anteil (rotes Licht) weniger stark gebrochen als der kurzwellige (blaues Licht), und es kommt zu einer Aufspaltung in die Spektralfarben des weißen Lichtes.

3.5 Überlagerung von Wellen und Interferenz

Zu einer Überlagerung kommt es, wenn in einem Raum zwei oder mehrere Wellen gleichzeitig aufeinander treffen. An den dort vorhandenen Schwingungen kommt es zur Vektoraddition der momentanen Ausschläge. Haben die resultierenden Schwingungen in jedem Punkt konstante Amplituden, bezeichnet man diese Überlagerung als Interferenz. So gibt es Punkte, an denen sich die Wellen auslöschen, also die resultierende Schwingungsamplitude Null ist, und Punkte, an denen die Amplituden maximalen Wert haben („maximale Verstärkung“). Damit Interferenz möglich ist, müssen die Wellen kohärent sein, d.h. sie müssen ebenfalls dauernd gleiche Amplituden haben, und ihre Phasenunterschiede müssen konstant bleiben.

Überlagerung zweier Kreiswellen

Material:

- Overheadprojektor
- Zwei Folien mit konzentrischen Kreisen

Aufbau und Durchführung:

Man schaltet den Overheadprojektor ein, legt die beiden Folien auf und verschiebt sie gegeneinander. Dabei kann man die Überlagerung zweier Kreiswellen beobachten.



Abb. 74: Überlagerung von Kreiswellen

Physikalischer Hintergrund:

Bei hinreichend großer Entfernung kann man die beiden überlagerten Kreiswellen erkennen. Es kommt zu Auslöschungen und Maxima, die auf Hyperbeln liegen.

3.5.1 Stehende Wellen

Dabei handelt es sich um eine Überlagerung zweier ebenen Wellen mit gleicher Amplitude x_0 , und gleicher Frequenz ν , die gegeneinander laufen. Dabei entstehen Orte, an denen sich das Medium jederzeit in Ruhe befindet (Bewegungsknoten), die in Abständen von jeweils halber Wellenlänge auftreten. Dazwischen bewegt sich das Medium, hier entstehen Bewegungsbäuche.

Um zwei gegenläufige gleiche Wellen zu erzeugen, ist es am einfachsten, eine fortschreitende ebene Welle an einer senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stehenden Mediengrenze zu reflektieren. Dabei unterscheidet man zwei Fälle:

Reflexion am „dünnere“ Medium

Material:

- Gummischlauch, an dem an einem Ende eine Schnur gebunden ist
- Stange zum Befestigen



Abb. 75: Bewegungsbauch unten

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt die Schnur an der Stange und lässt den Schlauch mit der Schnur schwingen.

Wenn man den Übergangspunkt Schlauch – Schnur genau betrachtet, kann man die Reflexion an einem dünneren Medium erkennen, nämlich dass an dieser Grenze ein Bewegungsbauch entsteht.



Abb. 76: Bewegungsbauch oben

Physikalischer Hintergrund:

Für Reflexion am dünneren Medium gilt: für Licht: $c_1 < c_2$, d. h. $n_1 > n_2$

für Schall: $\rho \cdot c_1 > \rho \cdot c_2$

Bei einer solchen Reflexion bleibt die Phase erhalten; die Welle besitzt an der Mediengrenze einen Bewegungsbauch. Bei Überlagerung der reflektierten Welle mit der ankommenden kommt es zu einer stehenden Welle (die Bewegungsknoten sind immer an den gleichen Orten ganz egal wie die Welle an die Mediengrenze trifft).

Reflexion am dichteren Medium

Material:

- Gummischlauch
- Stange zum Befestigen



Abb. 77: Bewegungsknoten

Aufbau und Durchführung:

Man befestigt ein Ende des Schlauches an einer Stange. Lässt man dann den Schlauch schwingen, so läuft eine Welle zur Befestigung, wird dort reflektiert und läuft wieder zurück. Wenn man das fixierte Ende beobachtet, kann man Reflexion am dichteren Medium erkennen. Es entsteht ein Bewegungsknoten.



Abb. 78: Bewegungsknoten

Physikalischer Hintergrund:

Für Reflexion am dichteren Medium gilt: für Licht: $c_1 > c_2$, d. h. $n_1 < n_2$
für Schall: $\rho \cdot c_1 < \rho \cdot c_2$

Trifft eine Welle auf eine Mediengrenze dieser Art, kommt es zu einem Phasensprung um π , d. h. zu einem Gangsprung um $\frac{\lambda}{2}$. Deswegen hat die resultierende Welle an der Mediengrenze einen Bewegungsknoten.

Kundtsches Rohr

Material:

- Epruvette
- Lycopodium- Pulver
- Schiedsrichterpfeife

Aufbau und Durchführung:

In die Epruvette füllt man ein wenig Lycopodium- Pulver und hält sie waagrecht, sodass das Pulver gut verteilt ist. Bläst man dann derart in die Pfeife, dass die Schallwelle in die Röhre kommt, bilden sich im Pulver Wellen und es entsteht ein periodisches Muster.

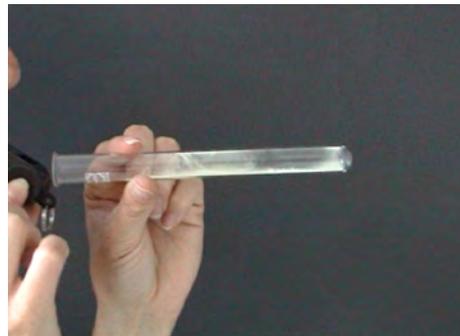


Abb. 79: Kundtsches Rohr

Physikalischer Hintergrund:

Durch den Ton aus der Pfeife entsteht im Inneren der Epruvette eine stehende Schallwelle. Durch die Schwingungen der Luftsäule wird das Pulver an den Bewegungsknoten „zusammengekehrt“ und an den Bewegungsbäuchen weggeblasen. So entstehen Lycopodiumhäufchen in der Epruvette.

Stehende Wellen

Material:

- Biigsame, geriffelte, beidseitig offene Kunststoffröhre (ungefähr 1 m lang)

Aufbau und Durchführung:

Man nimmt die Röhre an einem Ende in die Hand und macht eine Kreisbewegung, sodass das andere Ende wie ein Propeller über dem Kopf rotiert. Je nach Geschwindigkeit der Bewegung kann man unterschiedliche Töne hören.



Abb. 80: Rotationsbewegung mit einem Schlauch

Physikalischer Hintergrund:

Wenn man Luft in einem Rohr in Schwingung versetzt, erzeugt man so einen Ton. Dafür benötigt man eine ständige Luftströmung, die periodisch gestört wird.

In diesem Versuch wird durch die Drehbewegung am losen Ende ein Unterdruck durch die vorbeiströmende Luft erzeugt. Deswegen strömt vom offenen Ende, das man in der Hand hält, immer Luft durch die Röhre, die durch die Riffelung periodisch gestört wird. Es entstehen Druckschwankungen in der Röhre. Die Störung kann man sich wie eine Überlagerung verschiedenster Frequenzen vorstellen, von denen gerade diejenigen verstärkt werden, für die gilt:

$$l = (k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow v = (k + 1) \cdot \frac{1}{2l} \cdot c \quad (18)$$

l ...Länge des Rohrs

k ...0, 1, 2... (k.-Oberschwingung; da an den Enden Bewegungsbäuche sein müssen)

Je nachdem, wie schnell man das Rohr bewegt, entstehen also unterschiedliche Töne. Welche und wie viele Obertöne man erzeugt, hängt also von der Drehgeschwindigkeit ab. Da die ausführende Person das Rohr aber nicht beliebig schnell drehen kann, entstehen nur ein paar unterschiedliche Töne. Nach [4].

Betrachtet man Eigenschwingungen eines Körpers, so kann man sie unter bestimmten Bedingungen als stehende Wellen auffassen. Wir gehen hier auf lineare Systeme (Seile, Stäbe, Flüssigkeits- und Gassäulen) ein. Je nachdem ob ein Körper an beiden Enden, an einem oder an keinem „festgehalten“ wird, unterscheidet man verschiedene Fälle, in denen durch Oberschwingungen zusätzliche Bewegungsknoten auftreten:

Beidseitiges festes Ende:

Material:

- Evilonrohr (ungefähr 3 m lang)
- Zwei Versuchspersonen



Abb. 81: Auslenkung nach oben

Aufbau und Durchführung:

Beide Personen halten je ein Ende des Rohres fest. Wenn sie das Rohr schwingen, kann man die Grundschwingung erkennen.



Abb. 82: Auslenkung nach unten

Physikalischer Hintergrund:

An beiden Enden befindet sich ein Bewegungsknoten. In der Grundschiwingung ist demnach die Länge gleich der halben Wellenlänge, bzw. mit (18) gilt für $k=0$: $\lambda_1 = 2l$

und für die Grundschiwingung gilt nach (7): $v = \frac{c}{\lambda}$

Bei der 1. Oberschiwingung kommt ein Bewegungsknoten hinzu, bei der 2. zwei u. s. w.

Mit Hilfe von einfachen Überlegungen kann man für die Frequenzen der jeweiligen Oberschiwingungen folgendes finden:

$$v_m = m \frac{c}{2l} \text{ mit } m = 1, 2, 3... \quad (19)$$

Ein festes und ein freies Ende

Material:

- Evilonrohr (ungefähr 3 m lang)
- Versuchsperson



Abb. 83: Grundschiwingung

Aufbau und Durchführung:

Man hält das eine Ende des Rohres so fest, dass es waagrecht steht. Wenn man es dann bewegt, kann man die Grundschiwingung und bei schnellerer Bewegung die erste Oberschiwingung erzeugen.



Abb. 84: Erste Oberschiwingung

Physikalischer Hintergrund:

Am festen Ende befindet sich ein Bewegungsknoten und am freien ein Bewegungsbauch, deswegen gilt für die Grundschiwingung, dass die Wellenlänge gleich vier Mal der Länge des linearen Körpers ist. In diesem Fall gilt:

$$v_m = (2m - 1) \frac{c}{4l} \text{ mit } m = 1, 2, 3... \quad (20)$$

Flötenspielen unter Wasser

Material:

- Alte Blockflöte (wenn möglich nicht aus Holz, da sie nass wird)
- Gefäß mit Wasser



Abb. 85: Tonerzeugung in Luft

Aufbau und Durchführung:

Man verschließt alle Löcher der Flöte mit den Fingern oder mit einem Klebeband. Wenn man dann in die Flöte bläst, ist ein tiefer Ton zu hören. Taucht man die Flöte in das Gefäß mit Wasser, verändert sich der Ton. Er wird umso höher, je tiefer man die Flöte ins Wasser taucht.



Abb. 86: Tonerzeugung, wenn die Flöte ins Wasser taucht

Physikalischer Hintergrund:

In Inneren der Flöte entsteht eine Luftsäule, die schwingt. Beim Eintauchen ins Wasser ist eine Seite offen und die andere geschlossen, sodass die Grundschwingung eine Frequenz laut (20) mit $m = 0$ aufweist.

Je tiefer man die Flöte ins Wasser taucht, desto kürzer wird die Luftsäule und desto größer die Frequenz. Der Ton wird höher.

Zwei freie Enden

Material:

- Evilonrohr (ungefähr 3 m lang)
- Versuchsperson



Abb. 87: Schwingung nach oben

Aufbau und Durchführung:

Man hält das Rohr in der Mitte fest und bewegt es leicht auf und ab. Die beiden Enden beginnen zu schwingen. Es entsteht die Grundschiwingung, deren Bewegungsknoten am Anhaltepunkt ist (Dies ist nicht so für die 1. Oberschiwingung). An den freien Enden sind Bewegungsbäuche.



Abb. 88: Schwingung nach unten

Physikalischer Hintergrund:

Bei der Grundschiwingung ist in der Mitte ein Bewegungsknoten, und es gilt wie im ersten Fall: $\lambda_1 = 2l$

bzw. gilt für die Oberschiwingungen Formel (19).

In allen drei Fällen ist ν_m die m- te Eigenfrequenz, wobei ν_1 die Frequenz der 1. Eigenschwiwingung oder Grundschiwingung ist und ν_2, ν_3, \dots die Frequenzen der 2., 3.,... Eigenschwiwingungen oder 1., 2.,... Oberschiwingungen sind.

Mickey- Maus- Stimme

Material:

- Luftballon
- Reines Helium- Gas
- Versuchsperson

Aufbau und Durchführung:

Man füllt den Luftballon mit dem Helium- Gas. Die Versuchsperson nimmt den gefüllten Luftballon, atmet das Helium- Gas tief ein und spricht beim Ausatmen. Die Stimme ist höher geworden und erinnert an die von Mickey Maus.



Abb. 89: Einatmen des Heliums

Physikalischer Hintergrund:

Der Klang der Stimme ist im Wesentlichen von der Anzahl bzw. der Mischung der Oberwellen abhängig, die beim Sprechen erzeugt werden. Auch wenn man das Helium- Gas einatmet, ist die Frequenz der Schallwellen gleich wie ohne Helium, weil sie gleich von den Stimmbändern und der Stimmritze erzeugt werden. Der Schall wird dann vom Rachenraum gefiltert. Welche Oberwellen gefiltert bzw. erzeugt werden, hängt vom Volumen und der Form des Raumes sowie vom Gas, das sich darin befindet, ab. Durch das Einatmen von Helium- Gas füllt sich der Rachenraum beim Sprechen bzw. Ausatmen mit dem Gas. Da die Schallgeschwindigkeit in Helium- Gas größer ist als in Luft ($c_{Luft} = 340 \text{ m/s}$ und $c_{Helium} = 1020 \text{ m/s}$), werden andere Oberwellen im Rachenraum angeregt, und es entsteht die lustige, hohe Mickey Maus Stimme.

Überlagerung und Interferenz

Material:

- Overheadprojektor
- Durchsichtige Plexiglaswanne
- Wasser
- Zwei Finger

Aufbau und Durchführung:

Man stellt die Plexiglaswanne mit Wasser auf den Overheadprojektor und schaltet ihn ein. Taucht man dann zwei Finger synchron in periodischer Bewegung immer wieder ins Wasser, entstehen zwei Kreiswellen, die sich überlagern.



Abb. 90: Überlagerung von Elementarwellen

Physikalischer Hintergrund:

Durch die Überlagerung der Kreiswellen entstehen Orte, an denen maximale Amplitude herrscht, und Orte, an denen sich die Wellen auslöschen.

Ist die resultierende Amplitude gleich Null, so handelt es sich um destruktive Interferenz. Zu einer konstruktiven Interferenz kommt es, wenn die resultierende Amplitude maximal ist.

3.5.3 Optische Interferenzen

Newtonringe

Material:

- Schwach gekrümmte Glaslinse
- Ebene Glasscheibe
- Natürliches Licht
- Weißes Blatt Papier

Aufbau und Durchführung:

Wenn natürliches Licht durch die Linse und die Glasscheibe tritt, kann man unter einem bestimmten Winkel ringförmige, gefärbte Ringe erkennen. Wenn man die Anordnung auf ein weißes Blatt Papier legt, wird der Effekt noch besser sichtbar.



Abb. 91: Newtonringe

Physikalischer Hintergrund:

Bei optischen Interferenzerscheinungen unterscheidet man zwischen folgenden Fällen:

1) Interferenz gleicher Neigung:

Hier entstehen Interferenzmuster, die an dünnen Schichten konstanter Dicke auftreten. Geht man davon aus, dass ein Lichtstrahl unter einem bestimmten Winkel α eintritt, so wird er beim Auftreffen auf die Grenzschicht durch Brechung und Reflexion in zwei kohärente Lichtstrahlen gespalten. Mit dem gebrochenen Anteil geschieht das gleiche an der zweiten Grenzschicht. Der dort reflektierte Strahl wird an der Ersten wieder aufgespalten. Der hier gebrochene Anteil tritt aus der Schicht aus. Es entstehen zwei Lichtteile, die einen bestimmten Phasenunterschied $\Delta\varphi$ aufweisen. Diese kann man durch eine Linse (z. B. Augenlinse) und einen Schirm (Netzhaut) zusammenführen. Je nach Phasenunterschied kommt es dann im Grenzfall zu einer Auslöschung oder einer maximalen Verstärkung. Variiert man den Winkel α , so kommt es zu einer Folge von hellen und dunkeln Punkten.

Bei der Verwendung von weißem Licht entsteht sogar eine periodische Folge von Farben, da die Auslöschung bei einem bestimmten Einfallswinkel nur für eine bestimmte Wellenlänge erfolgt und die restlichen Wellenlängen (Komplementärfarben) unterschiedlich stark erhalten bleiben.

2) Interferenz gleicher Dicke

Betrachtet man im einfachsten Fall einen flachen Keil (Veränderung der Dicke) in Luft, so ist leicht ersichtlich, dass die Verhältnisse komplizierter sind. Jedoch kann man näherungsweise kleine Bereiche der Keilfläche betrachten, in denen der Fall 1) gilt. Dort kann man erkennen, dass der Phasenunterschied von der örtlichen Keildicke abhängig ist. Es entsteht ein periodischer Farbstreifen. Nach [3]

Bei unserem Versuch verwenden wir eine gekrümmte Linse, die einen kreisförmigen Luftkeil entstehen lässt. Auf Grund dessen kommt es bei senkrechtem Lichteinfall zu konzentrischen Ringen, deren Farben sich periodisch wiederholen. Es handelt sich somit um eine Interferenzerscheinung gleicher Dicke.

Seifenlamellen

Material:

- Seifenlauge oder Pustefix
- Geschlossener Kupferdraht
- Lampe

Aufbau und Durchführung:

Man taucht den Kupferdraht vollständig in die Seifenlauge und zieht ihn dann vorsichtig heraus. Der ganze „Ring“ soll vollständig mit einer Lamelle überzogen sein. Anschließend beleuchtet man die Lamelle leicht schräg mit der Lampe. Dort kann man dann bunte Interferenzmuster oder auch Interferenzstreifen sehen.



Abb. 92: Seifenlamelle

Physikalischer Hintergrund:

Die Lamelle besteht aus einer inhomogenen Schicht von Seifenlauge, wobei die Dicke durch die Erdanziehung nach unten hin vergrößert wird.

Es tritt sowohl Interferenz gleicher Dicke als auch Interferenz gleicher Neigung auf, was die unterschiedlichen Muster entstehen lässt.

Rezept zur Herstellung einer Seifenlauge:

Verwendet man nur Wasser, in dem man Spülmittel aufgelöst hat, so funktioniert der Versuch nicht besonders gut. Am besten man verwendet Pustefix (Seifenblasenlösung), denn dies kann man günstig kaufen. Eine andere Möglichkeit ist die Herstellung einer Seifenlauge, indem man 50% Wasser mit 40% Glycerin und 10% Spülmittel vermischt. Mit dieser Lösung funktioniert der Versuch besonders gut, da die Seifenlamellen relativ lang haltbar sind. Nach [8]

3.6 Beugung

Beugung

Material:

- Overheadprojektor
- Plexiglaswanne
- Wasser
- Tropfpipette
- Keil

Aufbau und Durchführung:

Man stellt die Wanne mit Wasser auf den Overheadprojektor und gibt den Keil oder ein anderes Hindernis ins Wasser. Tropft man dann ein paar Tropfen Wasser in die Nähe des Keils, kann man erkennen, dass sich die Wellen auch im „Schattenbereich“ des Keils ausbreiten.



Abb. 93: Beugung

Physikalischer Hintergrund:

Unter Beugung versteht man die „Krümmung“ von Wellen an den Rändern von Hindernissen. Diese Erscheinung kann man mit Hilfe des Huygens- Fresnelschen Prinzips erklären. Nach diesem Prinzip entstehen an den Rändern Elementarwellen, die sich auch im Schattenbereich ausbreiten.

Im Wesentlichen kann man von zwei Grenzfällen ausgehen:

Fraunhofersche Beugung: Beugungserscheinungen von ebenen Wellen

Fresnelsche Beugung: Beugungserscheinungen von Kugelwellen

3.7 Polarisiertes Licht

Wie schon bereits erwähnt, nennt man Transversalwellen, bei denen die Schwingungsebene in jedem Punkt einer Welle in einer Ebene liegt, linear polarisiert. Natürliches Licht jedoch besteht aus vielen linear polarisierten, elektromagnetischen Wellenzügen (Transversalwellen), die statistisch verteilt in verschiedene Richtungen laufen. Deswegen ist natürliches Licht nicht linear polarisiert. Allerdings gibt es sog. Polarisatoren, mit denen man natürliches Licht polarisieren kann, d. h. die Wellenzüge parallel anordnen kann.

Polarisator und Analysator

Material:

- Overheadprojektor
- Zwei Polarisationsfolien

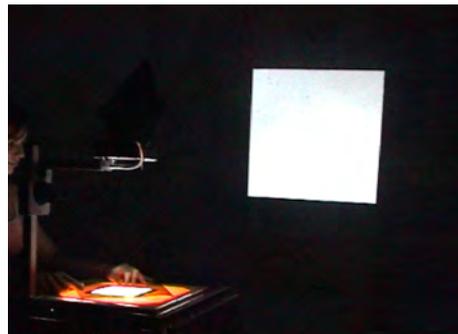


Abb. 94: Parallele Folien

Aufbau und Durchführung:

In einem abgedunkelten Raum nimmt man den Overheadprojektor in Betrieb. Legt man dann die erste Polarisationsfolie auf den Projektor, wird das Licht ein bisschen abgedunkelt. Wenn man dann die zweite Folie darüber legt und diese immer ein wenig weiter dreht, so verändert sich beim Drehen die Helligkeit. Einmal wird beinahe kein Licht durchgelassen, und dann erscheint es wieder mit der gleichen Intensität wie mit nur einer Folie.



Abb. 95: Gekreuzte Folien

Physikalischer Hintergrund:

Das weiße Licht des Overheadprojektors besteht aus mehreren Wellenzügen, die statistisch verteilt verschiedene Schwingungsebenen aufweisen. Das weiße Licht ist unpolarisiert. Es gibt aber Polarisatoren, wie die Folien im Versuch, die aus Molekülen bestehen, die durch z.B. einen chemischen Vorgang speziell ausgerichtet sind. Trifft weißes Licht auf einen Polarisator, so werden nur jene Wellenzüge durchgelassen, deren Schwingungsrichtung parallel bzw. antiparallel zur Ausrichtung der Moleküle ist. Die restlichen Wellenzüge werden absorbiert. Deswegen erscheint das Licht mit der ersten Folie dunkler.

Legt man dann die zweite Folie darüber, so werden wieder nur jene Wellenzüge durchgelassen, die eine spezielle Schwingungsrichtung aufweisen.

Liegen die beiden Folien so übereinander, dass ihre Moleküle parallel oder antiparallel ausgerichtet sind, sind die Schwingungsrichtungen der Wellenzüge des Lichtes bereits durch den Durchgang der ersten Folie ausgerichtet und gehen durch die zweite einfach durch. Wenn die zweite Folie aber so auf der ersten liegt, dass ihre Moleküle senkrecht zur ersten ausgerichtet sind, sind die Wellenzüge, die der zweiten Folie entsprechen würden, bereits von der ersten absorbiert worden, während die Wellenzüge, die durch die erste Folie durchgegangen sind, von der zweiten absorbiert werden. Beim Drehen um den Winkel α wird nur mehr folgende Intensität I_A durch den Analysator durchgelassen:

$$I_A = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (21)$$

I_0 ...Intensität, die durch den Polarisator (erste Folie) durchgelassen wird

Linear polarisiertes Licht kann man im Wesentlichen auf zwei Arten erzeugen:

1) Durch Reflexion

Wenn natürliches Licht aus der Luft unter einem bestimmten Winkel α_B , dem sog. Brewster-Winkel, auf eine nichtmetallische Fläche trifft, so ist das reflektierte Licht vollständig linear und das gebrochene teilweise polarisiert. Jedoch müssen dafür der reflektierte und der durchgelassene Strahl aufeinander normal stehen und es gilt:

$$\tan \alpha_B = n \quad (22)$$

n ...Brechzahl des Mediums

2) Durch Doppelbrechung

Geht ein Lichtstrahl durch ein anisotropes Medium, so wird er in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Lichtstrahl aufgespaltet. Der ordentliche Strahl wird nach dem Brechungsgesetz gebrochen, und der außerordentliche verhält sich, als hätte das Medium eine andere Brechzahl. Die aufgespalteten Strahlen breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus, ihre Polarisierungen sind senkrecht zueinander, und sie haben eine Phasenverschiebung. Je nach Größe dieser Phasenverschiebung erhält man unterschiedliche Polarisierungen.

Damit man mit doppelbrechenden Kristallen linear polarisiertes Licht erzeugen kann, muss man einen der beiden Lichtanteile abtrennen. Bei dichroitischen Kristallen geschieht dies von selbst. Beispiele dafür sind u. a. Turmalin und Herapathit. Hier reichen dünne Schichten für eine totale Absorption eines Lichtanteils, jedoch weisen sie immer eine gewisse Färbung auf. Zur Erzeugung von weißem polarisiertem Licht, muss man „wasserhelle“, doppelbrechende Kristalle verwenden, wie z. B. Kalkspat, bei dem man einen der Lichtanteile künstlich entfernt. Eine Anwendung dafür ist das Nicolsche Prisma. Es besteht aus zwei mit Kanadabalsam verkitteten Kalkspatprismen. Die Kittschicht ($n_{\text{Kitt}} = 1,542$) ist für den ordentlichen Strahl ($n_o = 1,658$) ein dünneres Medium, so kann man durch geeignete Anordnung der Prismen den Grenzwinkel der Totalreflexion des ordentlichen Strahles überschreiten, sodass der Strahl total reflektiert und an einer geschwärzten Seitenfläche absorbiert wird. Für den außerordentlichen Strahl ($n_{ao} = 1,49$) hingegen ist die Kittschicht ein dichteres Medium und er wird nicht total reflektiert und kann durchtreten. Nach [3]

Spannungsoptik

Material:

- Overheadprojektor
- Zwei Polarisationsfolien
- Kunststoffkeil

Aufbau und Durchführung:

Zuerst muss man den Overheadprojektor einschalten. Dann legt man den Kunststoffkeil zwischen den zwei Polarisationsfolien, die man gekreuzt hat, auf den Overheadprojektor. Wenn man dann durch Zusammendrücken der beiden Enden des Keils den Kunststoff einer Spannung aussetzt, kann man an der Abbildung erkennen, dass sich die Farbkomponenten im Inneren des Keils beim Zusammendrücken verändern.



Abb. 96: Keil unter Spannung

Physikalischer Hintergrund:

Der Kunststoff besitzt die Eigenschaft, dass sich die Eigenschwingungen der Moleküle bei Zug- oder Druckbeanspruchung in eine bestimmte Richtung einstellen. So entstehen im Keil Gebiete, an denen Doppelbrechung auftritt.

Wenn man den Keil unter Spannung bringt, indem man ihn zusammendrückt, wird im Inneren das polarisierte Licht gedreht, das nach (21) anteilmäßig durch den Analysator durchgelassen wird.

4 Literaturverzeichnis

- [1] HAHN H.: Physikalischer Freihandexperimente Band 1, Verlag Otto Salle Berlin, 1905

- [2] KORN B.: Der Freihandversuch in der Sekundärstufe I, Hausarbeit am Institut für Didaktik der Physik der Universität Siegen, 1981

- [3] JÄGER H.: Skriptum zur Vorlesung Experimentalphysik 1, 27. Auflage, Institut für Experimentalphysik der TU Graz, 2003

- [4] HIRSCHIER H. u. a.: Physikalische Freihandexperimente Band 1 und Band 2, Aulis Verlag Deubner, 2004

- [5] JEWETT John. W, Jr.: Physics Beging with an M...Mysteries, Magic, and Myth, Allyn and Bacon, 1994

- [6] WOOD Robert W.: Physics for Kids – 49 Easy Experiments with Acoustics TAB, 1991

- [7] WOOD Robert W.: Physics for Kids – 49 Easy Experiments with Optics, TAB, 1990

- [8] AUER David.: Physikalische Freihandversuche aus Optik, Karl- Franzens- Universität und Technische Universität Graz, 2005