MEHR ERFAHREN

TRAINING

Gymnasium

Physik – Mittelstufe 2

STARK

Inhalt

Vorwort

1 Atome **1**

1.1 Aufbau der Atome 1
Atommodelle 1
Periodensystem der Elemente (PSE) 4

1.2 Aufnahme und Abgabe von Energie 6
Kontinuierliches Spektrum 6
Diskretes Spektrum 8
Wasserstoffspektrum 9
Licht als Strom von Energiepaketen 11
Fotoeffekt 12
Röntgenspektren 13

1.3 Kernumwandlungen 19
Kernspaltung 20
Kernfusion 22

1.4 Strahlung radioaktiver Nuklide 25
Strahlungsarten und Eigenschaften 25
Nachweis der Radioaktivität 26
Zerfall radioaktiver Stoffe 29
Altersbestimmung mithilfe der Radioaktivität: C14-Methode 32
Strahlenschutz 33

2 Kinematik und Dynamik geradliniger Bewegungen **39**

2.1 Bewegungsgesetze 39

2.2 Darstellung von Bewegungsabläufen 47

3 Newton'sche Mechanik **63**

3.1 Die Newton'schen Gesetze 63

3.2 Eindimensionale Bewegungen 67
Bewegungen mit konstanter Beschleunigung 67
Bewegungen bei veränderlicher Beschleunigung 68

3.3 Zweidimensionale Bewegungen 74
Waagerechter und schräger Wurf 74
Kreisbewegungen 77

Fortsetzung siehe nächste Seite

4 Wellen und Quanten 89
4.1 Ausbreitung von Wellen 89
Eindimensionale Wellenausbreitung 89
Zweidimensionale Wellenausbreitung 94
4.2 Interferenz und Beugung 99
4.3 Wellen- und Teilcheneigenschaften von Licht und Materie 107
Interferenz von Licht am Doppelspalt 107
Licht – Welle und Teilchen! 111
Elektronen – Teilchen und Welle! 114

5 Astronomische Weltbilder 121
5.1 Geozentrisches und heliozentrisches Weltbild 121
5.2 Die Kepler'schen Gesetze 125

Lösungen 131

Autor: Florian Borges

Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

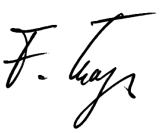
das „Training Physik Mittelstufe“ hilft dir, **physikalische Zusammenhänge zu verstehen** und das **Rechnen von Physikaufgaben** zu trainieren. Der Physikstoff der Klassen 8 bis 10 wird dabei in zwei Trainingsbänden ausführlich dargestellt.

Der Band 2, den du in Händen hältst, vermittelt dir alle wichtigen Themen, die du im Physikunterricht des zweiten Abschnitts der gymnasialen Mittelstufe kennenlernst: Das erste Kapitel befasst sich mit der Welt der kleinsten Teilchen, den **Atomen**, das zweite und dritte Kapitel handelt von der **Mechanik**, deren Gesetzmäßigkeiten entscheidend unseren ganz normalen Alltag bestimmen. Das vierte Kapitel setzt sich im ersten Teil mit **Wellenerscheinungen** wie den bekannten Wasserwellen auseinander, aber auch mit Schall- und Lichtwellen. Dass Licht sich manchmal auch verhält, als ob es aus Teilchen oder **Quanten** bestünde, umgekehrt – und noch rätselhafter – Materieteilchen sich manchmal wie Wellen verhalten, stellt sich im zweiten Teil des Kapitels heraus. Den Abschluss bildet das Kapitel zu den **Astronomischen Weltbildern**, die die Bewegung der Sonne, unserer Erde und der anderen Planeten erklären.

Jedes Kapitel dieses Buches ist einheitlich gegliedert:

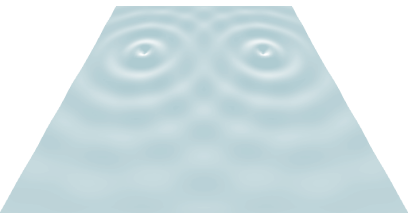
- Zunächst werden der Unterrichtsstoff besprochen, **Fachausdrücke** erklärt und **Formeln** erläutert. Dabei sind die wichtigsten **Regeln** immer in Kästen zusammengefasst und hervorgehoben, sodass sie auch beim Durchblättern leicht auffindbar sind.
- Zu jedem Stoffgebiet lernst du anhand von **Beispielaufgaben** die typischen Fragestellungen zu diesem Thema kennen. Ausführliche Lösungen zeigen dir unmittelbar anschließend, wie man derartige Aufgaben am besten angeht.
- Ganz wichtig sind die zahlreichen **Aufgaben**, die nach jedem neuen Sinnabschnitt folgen. Dadurch, dass du diese Aufgaben **selbstständig** löst, lernst du den Stoff und das Lösen von Physikaufgaben am besten. Orientiere dich dabei an den Beispielaufgaben. Die mit einem Stern **(✱)** gekennzeichneten Aufgaben sind etwas anspruchsvoller und regen in besonderer Weise zum Nachdenken an; du kannst sie beim ersten Durcharbeiten auch überspringen.
- Zur **Kontrolle** des Lösungsweges und deiner Ergebnisse findest du am Ende des Buches im Lösungsteil die **ausführlichen Lösungen** zu jeder Aufgabe.

Ich wünsche dir viel Erfolg bei deinem Physiktraining mit diesem Buch!



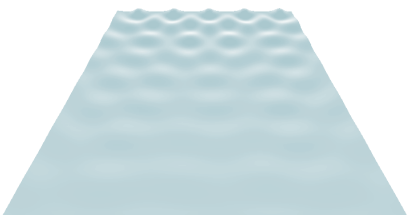
4.2 Interferenz und Beugung

Bisher haben wir ein- und zweidimensionale Wellen betrachtet, die sich von einem Erregerzentrum aus fortgepflanzt haben. Was passiert, wenn zwei oder mehr getrennt erzeugte Wellen aufeinander treffen?

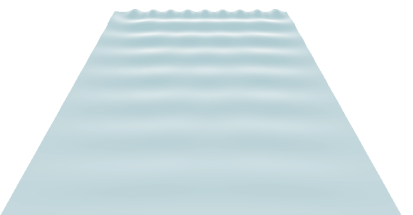


Um diese Frage zu klären, konzentrieren wir uns auf Wasserwellen, die phasengleich von punktförmigen, gleichartigen Erregern in konstantem Abstand erzeugt werden. Erreichen beide Wellen einen gemeinsamen Punkt der Wasseroberfläche, kommt es zur Überlagerung oder **Interferenz** der Wellen d. h., es wirken auf das Wasserteilchen in diesem Punkt die Auslenkungskräfte beider Wellen. An den Stellen, die gerade von zwei Wellenbergen getroffen werden, findet sich demnach ein besonders hoher Wellenberg, beim Aufeinandertreffen zweier Täler ein besonders tiefes Tal. Treffen Berg und Tal aufeinander, kommt es zur gegenseitigen **Auslöschung**: das Wasserteilchen bleibt unausgelenkt wie im Ruhezustand. Die Gesamtheit der interferierenden Wellenfronten zweier solcher **Elementarwellen** (punktförmig erzeugte Einzelwellen) bildet das sogenannte **Interferenzmuster**.

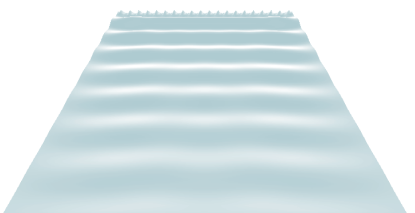
Lässt man viele Elementarwellen von kammförmig angeordneten Punkten in einer Linie erzeugen, so entsteht mit zunehmender Erregerdichte durch Interferenz von immer mehr Elementarwellen nahezu das gleiche Wellenmuster wie bei einem langgestreckten, geradlinigen Erreger, dessen Wellenfronten Parallelen zur Balkenrichtung sind (die in den Bildern dargestellten Wellen werden im Bildhintergrund erzeugt und laufen auf den Betrachter zu):



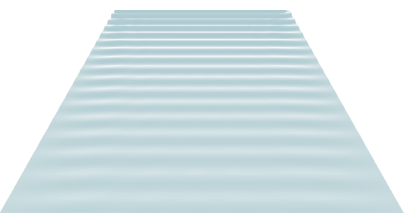
5 Punkterreger



9 Punkterreger



20 Punkterreger



waagerechter Balken als Erreger

Grundsätzlich kann man das Verhalten der Wellen sehr gut verstehen, wenn man sich das sogenannte **„Prinzip von Huygens“** vor Augen hält:

Regel

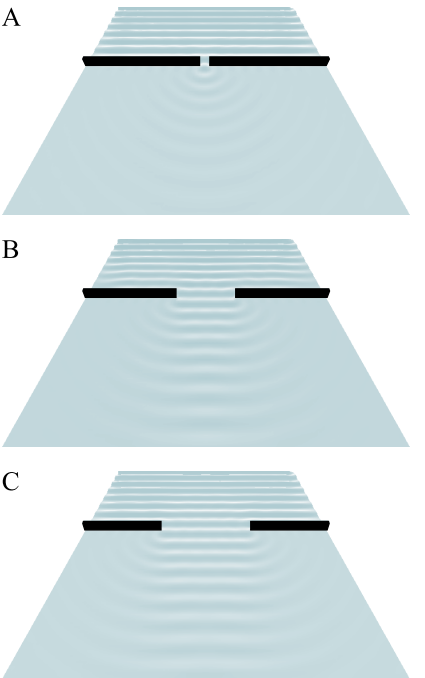
> Jede Welle erzeugt in jedem Punkt, den sie erreicht, eine neue Elementarwelle. Alle neu erzeugten Elementarwellen interferieren miteinander.

Betrachte nun nochmals das erste Bild mit den 5 Erregungszentren: Man sieht noch deutlich die 5 Elementarwellen, die miteinander interferieren. Im zweiten Bild mit den 9 Zentren erkennt man schon deutlich die nahezu geradlinigen Wellenfronten, die meisten seitlichen Anteile der 9 Elementarwellen interferieren sich gegenseitig weg. Bei 20 Punkten im dritten Bild unterscheidet sich das Wellenmuster kaum noch von dem eines geraden Balkens, der anstelle der 20 Punkte eintaucht.

Mit dem Huygens’schen Prinzip lassen sich viele weitere grundlegende Wellenphänomene erklären, etwa die **Beugung**: Warum setzen sich Wellen hinter einem Hindernis auch in dessen „Schatten“ fort?

Stellen wir uns hierzu eine Wand als Hindernis vor, die an einer Stelle ein Loch hat (kleinen Einfachspalt, Bild A). Schickt man geradlinige Wellenfronten senkrecht auf das Hindernis zu, treten hinter dem Einfachspalt kreisförmige Wellen auf, die auch den Bereich seitlich hinter dem Hindernis erreichen. Nach Huygens wird im Loch des Hindernisses durch die von hinten kommende Welle eine Elementarwelle ausgelöst, die sich dann hinter dem Hindernis kreisförmig ausbreitet.

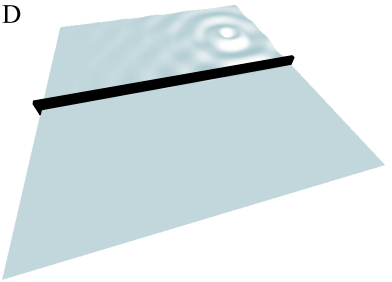
Wird der Spalt sehr breit, dann kommt in der Mitte die Welle ungestört durch und die Beugung tritt nur im Randbereich auf (Bilder B und C).



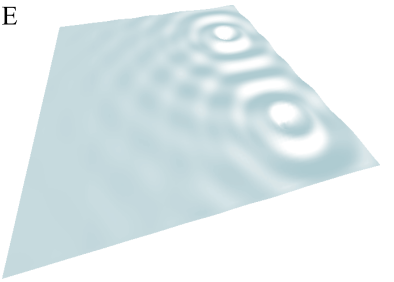
Die **Reflexion** von elastischen Wellen haben wir in Abschnitt 4.1 für eindimensionale Wellen bereits kennen gelernt, wir können dir dort getroffenen Aussagen auf zweidimensionale Wellen übertragen: Die Reflexion einer Wasserwelle an einer Wand ist eine Reflexion am losen Ende (die Randteilchen des Wassers sind schließlich nicht in der Wand verankert), erfolgt also ohne Phasensprung. Die

Ausbreitungsrichtungen von einfallender und reflektierter Welle gehorchen dabei dem gleichen Reflexionsgesetz, das auch in der Optik für Lichtstrahlen gültig ist: Der Einfallswinkel – also der Winkel zwischen der Normalen auf die Wand und der Wellennormalen der einfallenden Welle – ist gleich dem Ausfallwinkel. Dass das so ist, liegt wieder am Huygens'schen Prinzip: Die Ausgangswelle interferiert mit den an der Wand erzeugten Elementarwellen, die zusammengenommen die reflektierte Welle bilden. Das entstehende Muster (Bild D) sieht so aus, als würde die Ausgangswelle mit einer spiegelsymmetrisch gegenüber der Wand liegenden Elementarwelle interferieren, nachdem die Wand entfernt worden ist (Bild E):

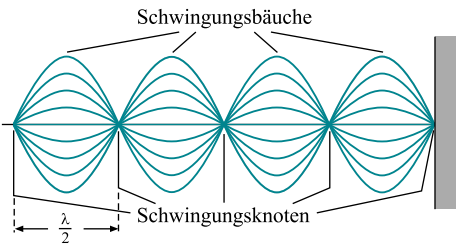
D



E



Eine Besonderheit tritt bei der Reflexion einer senkrecht auf ein Hindernis eintreffenden Welle ein; im Fall unserer Wasserwelle liegen die Wellenfronten also parallel zur Wand. Die Welle wird in sich zurückgeworfen, die Wellenfronten der reflektierten Welle verlaufen ebenfalls parallel zur Wand.



Da einlaufende und reflektierte Welle gleiche Wellenlänge und gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen (beide Größen werden bei der Reflexion nicht geändert), kompensieren sich die gegenläufigen Phasenbewegungen und die Wellen interferieren zu einer **stehenden Welle**: Die resultierende Welle scheint sich nicht von der Stelle zu bewegen; vielmehr bleibt als Bewegung nur die Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung übrig, wobei die Amplitude dieser Schwingung längs der Wellennormalen periodisch zu- und abnimmt. Die Stellen mit maximaler Amplitude heißen **Schwingungsbäuche**, diejenigen, an denen die Amplitude null ist, **Schwingungsknoten**. Der Abstand zweier aufeinander folgender Bäuche bzw. Knoten ist halb so groß wie die Wellenlänge der Ausgangswelle.

Die beschriebenen Bedingungen, die zur Ausbildung einer stehenden Welle führen, sowie deren Eigenschaften gelten allgemein für alle Quer- und Längswellen:

Regel

Stehende Wellen entstehen durch Interferenz zweier Wellen mit gleicher Wellenlänge λ, aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass

- ihr räumliches Wellenbild steht;
- die Schwingungsamplituden ortsabhängig sind und sich im Abstand $\frac{\lambda}{2}$ wiederholen;
- sich ortsfeste Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten ausbilden.

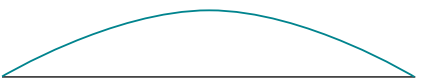
Beispiel

Manchmal kann man an Steilküsten bei starkem Seegang braune Streifen beobachten, die parallel zur Küstenlinie verlaufen und nicht mit den Meereswellen treiben, sondern stillstehen. Wie entstehen sie?

Lösung:
Im Gegensatz zu flachen Sandstränden laufen sich die Wasserwellen an Steilküsten nicht tot, sondern werden reflektiert. Ein- und auslaufende Wellen interferieren zu einer stehenden Welle, an deren Knoten das Wasser still steht und sich Tang ansammeln kann.

Begrenzt man die Ausbreitung von Wellen nicht nur von einer, sondern von beiden Seiten senkrecht zur Wellennormalen, werden die Teilwellen fortwährend ineinander reflektiert. Im Allgemeinen löschen sie sich dadurch nach einer gewissen Zeit vollständig aus, weil irgendwann immer ein Wellenberg auf ein Wellental trifft. Beträgt der Abstand der Begrenzungen aber ein Vielfaches der halben Wellenlänge, dann können die Teilwellen zu einer stehenden Welle interferieren, die dauerhaft innerhalb der Begrenzungen schwingt.
Solche stehende Wellen treten beispielsweise bei den Musikinstrumenten auf, bei denen Schallwellen durch Schwingungen eines begrenzten Wellenträgers (die Saite bei Streich-, Zupf- und Tasteninstrumenten wie dem Klavier; die eingeschlossene Luftsäule in einem Blasinstrument) erzeugt werden.

Bei den **Saiteninstrumenten** schwingt ein dünner Strang aus Stahl, Kunststoff oder Tierdarm, der an beiden Enden eingespannt ist. Wird diese Saite ausgelenkt, dann entstehen verschiedenste Schwingungen, die sich als Welle entlang der Saite ausbreiten. An den Enden geschieht eine Reflexion am festen Ende, also mit Phasensprung von 180°.

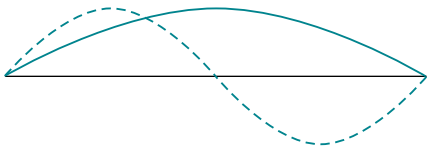


Momentaufnahme „oben“

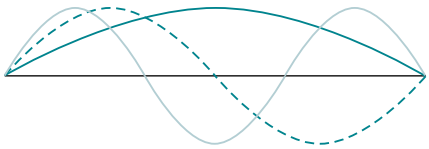
Momentaufnahme „unten“

Durch die Befestigungspunkte sind zwei Schwingungsknoten bereits vorgegeben. Damit sich die Teilwellen nicht auslöschen, muss sich eine stehende Welle ausbilden. Dies ist z. B. dadurch möglich, dass sich in der Mitte der beiden Knoten ein Schwingungsbauch bildet. Die Länge der Saite ist dann gleich der doppelten Wellenlänge der Teilwellen, die Saite befindet sich in der **Grundschwingung**. Die Abbildung zeigt zwei Momentaufnahmen.

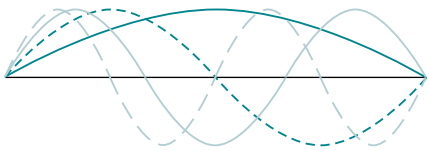
Es gibt aber noch weitere mögliche stehende Wellen, die am Ende jeweils einen Knoten aufweisen: Es könnten zwischen den Befestigungspunkten auch zwei, drei oder mehr Schwingungsbäuche sein. Man nennt diese Schwingungen **Oberschwingungen** der Saite.



Grund- und erste Oberschwingung



Grund-, erste und zweite Oberschwingung



Grund- sowie die ersten drei Oberschwingungen

Die Wellenlängen der Grund- und Oberschwingungen sind eindeutig durch die Saitenlänge L bestimmt. Nummerieren wir den Schwingungstyp gemäß der Anzahl n der auftretenden Schwingungsbäuche durch, gilt für die zugehörigen Wellenlängen $\lambda_{n,g}$:

$$L = n \cdot \frac{\lambda_{n,g}}{2} \Leftrightarrow \lambda_{n,g} = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, \ldots)$$

Da die Tonhöhe der angeregten Einzeltöne durch ihre Frequenz gegeben ist, folgt weiter (c: Schallgeschwindigkeit):

$$f_{n,g} = \frac{c}{\lambda_{n,g}} = \frac{c}{2L} \cdot n \quad (n = 1, 2, \ldots)$$

Bei den **Blasinstrumenten** schwingt eine Luftsäule im Inneren des Instrumentes. Es werden wiederum nur solche Schwingungen durch Interferenz verstärkt, die in geeigneter Weise am Ende der Luftsäule reflektiert werden, deren Wellenlängen also im richtigen Verhältnis zur Länge der Luftsäule stehen, sodass sich stehende Wellen ausbilden können. Bei schwingenden Luftsäulen sind aber im Vergleich zur Saitenschwingung nicht nur Reflexionen am festen Ende, sondern auch am offenen Ende möglich, je nachdem, ob eines der Blasrohrenden oder beide geschlossen oder offen sind (Beispiel: Flöte, Klarinette). Bei geschlossenem Rohrende erfahren die Wellen bei der Reflexion wie bei der Saite einen Phasensprung; dort liegt ein Schwingungsknoten der stehenden Welle. Bei offenem Rohrende findet kein Phasensprung statt, es bildet sich dort ein Schwingungsbauch der stehenden Welle aus.

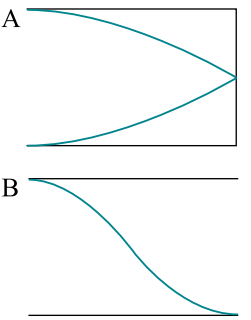


Bild A zeigt die Grundschwingung in einer links offenen und rechts geschlossenen Orgelpfeife, Bild B die Grundschwingung in einer beidseitig offenen Orgelpfeife. Im ersten Fall ist die Wellenlänge das Vierfache der Pfeifenlänge, im zweiten Fall das Doppelte der Pfeifenlänge. Die Frequenzen der Oberschwingungen ergeben sich beim **beidseitig offenen Rohr** wieder als Vielfache der Grundfrequenz; n bedeutet hier aber die Zahl der Schwingungsknoten:

$$f_{n,b} = \frac{c}{\lambda_{n,b}} = \frac{c}{2L} \cdot n \quad (n = 1, 2, \ldots)$$

Um beim **einseitig offenen Rohr** Oberschwingungen zu erzeugen, die auf der einen Seite einen Bauch, auf der anderen Seite einen Knoten aufweisen, muss man die Grundwellenlänge $\lambda_{1,e} = \frac{L}{4}$ so verkleinern, dass die Rohrlänge L ein ungeradzahliges Vielfaches der Wellenlänge $\lambda_{n,e}$ wird:

$$L = (2n-1) \cdot \frac{\lambda_{n,e}}{4} \Leftrightarrow \lambda_{n,g} = \frac{4L}{2n-1} \quad (n = 1, 2, \ldots)$$

Daraus folgt für die Frequenz der Grund- und Oberschwingungen des einseitig geschlossenen Rohres:

$$f_{n,e} = \frac{c}{\lambda_{n,e}} = \frac{c}{4L} \cdot (2n-1) \quad (n = 1, 2, \ldots)$$

Zupft oder streicht man eine Saite an oder bläst man einen Ton auf einem Blasinstrument an, bilden sich Grund- und Oberschwingungen gleichzeitig aus, deren Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Zahl und Stärke charakteristisch für das betreffende Saiteninstrument sind und für den typischen Klang des Instruments sorgen. Dies gilt generell für alle „akustischen" Musikinstrumente, in denen die Töne durch ein schwingendes Medium erzeugt werden (im Gegensatz zu den synthetisch erzeugten Tönen von elektronischen Instrumenten).
Verantwortlich für die Gewichtung der Obertöne und damit der Klangfarbe ist neben der Art der Tonerzeugung das sogenannte **Resonanzverhalten** des Instrumentenkörpers, also seine Eigenschaft, bestimmte Frequenzen zu verstärken oder abzuschwächen (die schwingende Saite allein macht noch keine Geige!). Diese Resonanzeigenschaft weisen nicht nur Musikinstrumente, sondern alle schwingfähigen Systeme auf. Jeder solche Körper besitzt eine oder mehrere „Lieblingsfrequenzen", bei denen er besonders „gerne" schwingt; man bezeichnet diese Lieblingsfrequenzen als **Eigenfrequenzen** des Systems. Wird eine dieser Frequenzen angeregt, dann schaukeln sich die Schwingungen dieser Frequenz bei weiterer Anregung immer stärker auf, die Amplituden werden immer größer. Die Form einer Geige oder einer Trompete ist daraufhin optimiert, diese Eigenfrequenzen kontrolliert herauszuarbeiten, sodass ein „schöner" Ton entsteht. Das Aufschaukeln, das nur durch Energieverluste aufgrund von Reibung begrenzt ist, kann aber auch unkontrolliert erfolgen und das Amplitudenmaximum sehr groß werden:

- Typische Fälle sind Brücken, deren Eigenfrequenz etwa im Bereich um 0,5 Hz liegt. Wenn eine Soldatengruppe im Gleichschritt darüber marschieren würde, könnte die Brücke so stark in Schwingung versetzt werden, dass sie einstürzt. Deswegen vermeiden die Militärs diese Gefahr.
- Die Tacoma-Bridge in Amerika wurde durch Wind zur Resonanzschwingung angeregt, bis sie schließlich einstürzte.
- Bei alten Autos kennt man das Phänomen, dass immer bei einer bestimmten Geschwindigkeit manche Fahrzeugteile kräftig scheppern, also etwa bei Tempo 50 km/h die Türverkleidung, bei 60 km/h das Armaturenbrett, bei 80 km/h der Innenspiegel oder ähnliches; bei größeren Geschwindigkeiten verschwindet das Geräusch dann wieder. Auch hier handelt es sich um Resonanzschwingungen, die durch die Drehbewegungen in Motor und Fahrwerkteilen angeregt werden.

Beispiel

Eine zunächst beidseitig offene Orgelpfeife wird an einem Ende verschlossen („gedackt“). Wie verändert sich der Ton?

Lösung:
Am offenen Ende geschieht Reflexion „am losen Ende“ und damit ohne Phasensprung, folglich muss dort ein Schwingungsbauch liegen. Im Grundton passt also gerade eine halbe Wellenlänge in die Pfeife. Bei der gedackten Orgelpfeife muss auf der geschlossenen Seite ein Knoten liegen, also hat eine Viertelwellenlänge Platz. Die Wellenlänge des Grundtons verdoppelt sich also, die Frequenz halbiert sich: Der Ton wird um eine Oktave tiefer.

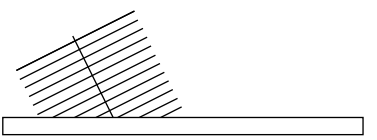
Aufgaben

119. Der Wolf und die sieben Geißlein

In dem Märchen frisst der Wolf Kreide, damit er eine sanftere Stimme bekommt. Er könnte zum gleichen Zweck auch Helium einatmen, sodass seine Stimme höher wird. Erkläre dieses Phänomen anhand einer (zunächst luftgefüllten) Flöte, die gerade einen bestimmten Ton von sich gibt und in der die Luft nach und nach durch Helium ersetzt wird.

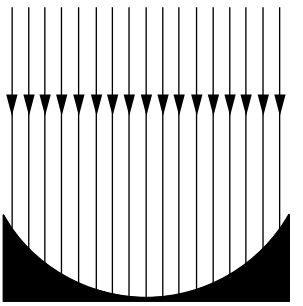
Hinweis: Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist etwa c_{Luft} 340 $\frac{m}{s}$, in Helium dagegen $c_{Helium} = 980 \frac{m}{s}$).

120. Überlege dir anhand einer Zeichnung die Richtigkeit des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallwinkel“ mithilfe des Huygens’schen Prinzips. Zeichne dazu eine geradlinige Schar paralleler Wellenfronten, die schräg auf eine Wand fallen.

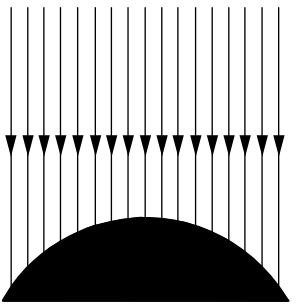


Ergänze nun (beispielhaft nur an den Auftreffpunkten der Fronten) die am Hindernis erzeugten Huygens'schen Elementarwellen als Halbkreise geeigneter Radien und kennzeichne gleichzeitig entstandene Elementarwellen durch gleiche Farbe. Ermittle zeichnerisch die gemeinsamen Tangenten jeweils einer Elementarwellen-Generation, sie stellen die reflektierten Fronten dar.

121. Wie wird eine Schar paralleler gerader Wellenfronten an einem „Hohlspiegel" (also einer kreisförmig zur Welle hin gekrümmten Wand) reflektiert?
(In der Skizze ist die Richtung, nicht die Front eingezeichnet!)



122. Wie wird eine Schar paralleler gerader Wellenfronten an einem „Wölbspiegel" (einer kreisförmig von der Welle weg gekrümmten Wand) reflektiert?
(Wieder ist in der Skizze die Richtung, nicht die Front eingezeichnet.)



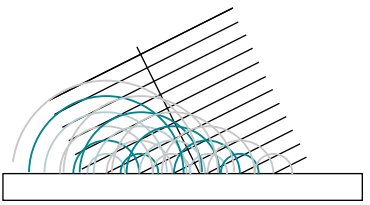
123. Der tiefste Ton, den ein durchschnittlich hörender Mensch wahrnehmen kann, ist das Subkontra-C (C_2) mit 16,35 Hz. Welche Länge muss eine
a) beidseitig offene Orgelpfeife,
b) eine gedackte Orgelpfeife
haben, um diesen Ton zu erzeugen (Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20 °C $c = 340 \frac{m}{s}$)?

124. Eine Saite wird angezupft und liefert den Kammerton a' ($f = 440$ Hz).
a) Berechne die Frequenzen der ersten drei Oberschwingungen.
b) Jetzt wird durch Drücken der Saite auf das Griffbrett der schwingende Teil der Saite um die Hälfte verkürzt. Welche Frequenz ergibt sich im Grundton und welcher Ton ist das?
c) Welcher Bruchteil der Saite darf noch schwingen, wenn der Grundton a' eine Quarte (Verhältnis 4 : 3) höher werden soll, also ein d"?

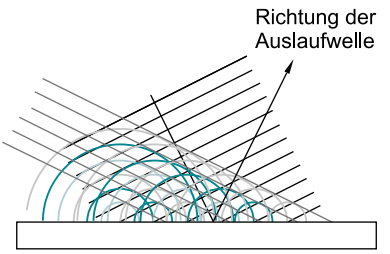
Es macht also einen Unterschied, ob die Quelle ruht und der Beobachter sich bewegt oder umgekehrt: Die *Tendenz* der Frequenzänderung ist zwar die gleiche (Erhöhung bei Annäherung, Erniedrigung bei Entfernung), aber der *Betrag* dieser Änderung unterscheidet sich. Der Unterschied wird dabei umso größer, je größer die Geschwindigkeit v ist.

119. Der Schall breitet sich in Helium schneller aus, die Geometrie des Klangkörpers (Flöte oder auch Wolf) ändert sich aber nicht, d. h. die Länge der schwingenden Gassäule bleibt gleich. Außerdem ist $c = \lambda \cdot f$ oder $\lambda = \frac{c}{f}$. Damit Töne erzeugt werden können, muss eine konstruktive Interferenz zwischen einfallenden und reflektierten Wellen ermöglicht werden. Da hierbei die Wellenlänge nur von der Länge der Gassäule abhängt und diese konstant ist, bleibt auch die Wellenlänge und damit $\frac{c}{f}$ gleich. Beim Helium ist aber die Schallgeschwindigkeit (und damit der Zähler) größer, folglich auch der Nenner: Die Frequenz steigt und der Ton wird höher.

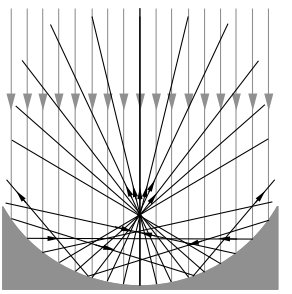
120. Zunächst die Halbkreise:



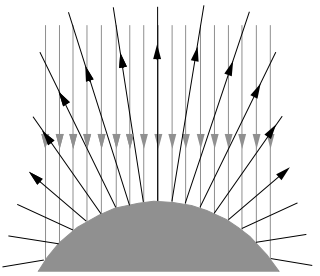
Mit Wellenfronten und Auslaufrichtung:



121. An jeder Stelle gilt das Reflexionsgesetz „Einfallswinkel = Ausfallwinkel“, wobei dieser jeweils wegen der krummen Oberfläche zur Tangente gemessen wird. Bei einer kreisförmigen Wand ergibt sich (wie auch in der Optik) nicht ein exakter Brennpunkt, in dem alle Wellen zusammenlaufen (das wäre bei parabelförmiger Wand der Fall!), sondern ein Bereich heftiger Wellenbewegungen („Kaustik“).



122. Auch hier ergeben sich nicht etwa (wie man beim ersten Nachdenken vermuten könnte) radiale „Strahlen“, sondern eine nach außen hin schwächere Verteilung der Wellenanteile.

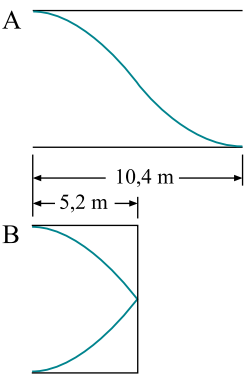


123. Die Wellenlänge ergibt sich mit der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ zu

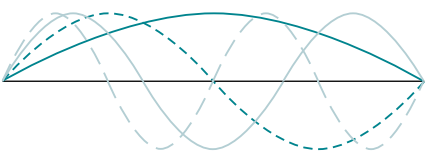
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}00 \cdot 10^8 \,\frac{m}{s}}{16{,}35 \,\frac{1}{s}} = 20{,}8 \text{ m}.$$

a) In einer beidseitig offenen Orgelpfeife ist an beiden Enden ein Bauch der stehenden Schallwelle. Folglich muss in der Grundschwingung die Wellenlänge das Doppelte der Pfeifenlänge sein, also hat die Pfeife eine Länge von 10,4 m (Bild A).

b) Bei der gedackten Pfeife befindet sich auf der geschlossenen Seite ein Schwingungsknoten. Demzufolge findet gerade eine viertel Wellenlänge in der Pfeife Platz und die Pfeife hat eine Länge von 5,2 m (Bild B).



124. a) Bei der Saite befinden sich an beiden Enden Schwingungsknoten, in der Grundschwingung liegt eine halbe Wellenlänge dazwischen. Bei den ersten drei Oberschwingungen treten zusätzlich ein, zwei bzw. drei weitere Knoten zwischen den Befestigungspunkten auf:



- Die erste Oberschwingung hat gerade die halbe Wellenlänge, also die doppelte Frequenz und damit 880 Hz. Der Ton a" („zweigestrichenes“ a) klingt eine Oktave höher.
- Die Wellenlänge der zweiten Oberschwingung passt gerade 1,5-mal auf die Saite. Sie beträgt also $\frac{2}{3}$ der Saitenlänge bzw. $\frac{1}{3}$ der ursprünglichen Wellenlänge, die Frequenz ist folglich dreimal so hoch und damit 1 320 Hz. Der Ton liegt eine Quinte (Verhältnis 3 : 2) über dem ersten Oberton (ein e'").

© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de

info@stark-verlag.de

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH ist urheberrechtlich international geschützt. Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung des Rechteinhabers in irgendeiner Form verwertet werden.

STARK