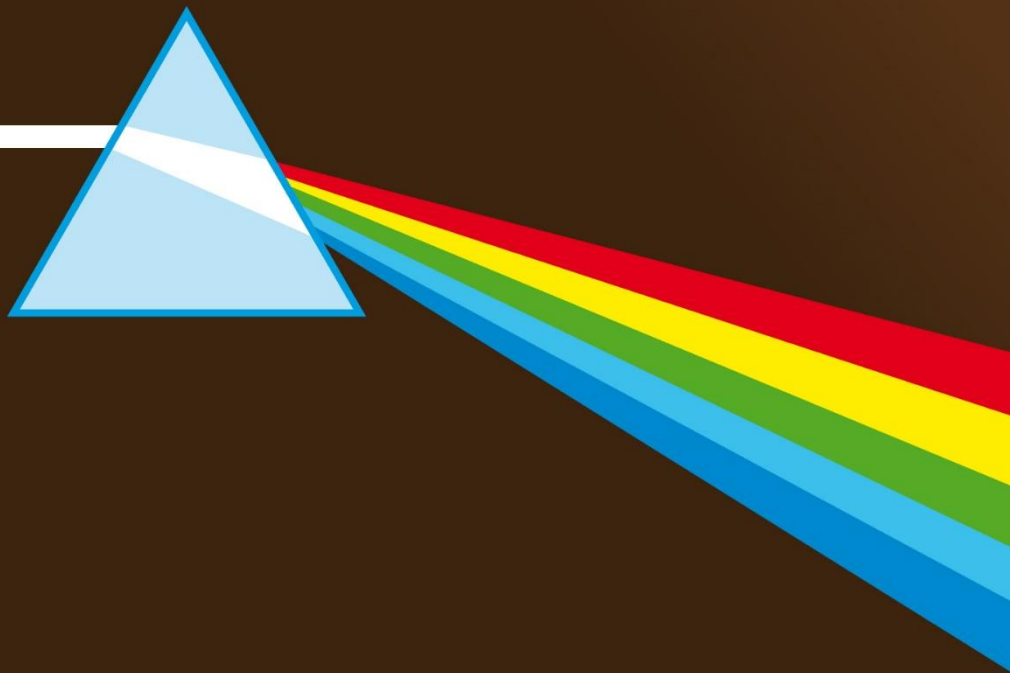




WELLEN, LICHT UND ELEKTRONEN

EINFÜHRUNG IN DIE QUANTENCHEMIE

Günter Baars

Quantenchemie und Chemie farbiger Stoffe

Modul 1: Wellen, Licht und Elektronen. Einführung in die Quantenchemie

Korrektur: Dina Baars, Bern

Illustrationen: Christoph Frei, Bern

3. Auflage 2026

Inhaltsverzeichnis

1	Wellen	4
1.1	Lernziele	4
1.2	Transversal- und Longitudinalwellen	4
1.3	Fortlaufende harmonische Wellen	7
1.4	Die Überlagerung (Interferenz) von Wellen; stehende Wellen	10
1.5	Stehende Wellen schwingungsfähiger Systeme	11
1.6	Übungen mit Lösungen zum Kapitel 1	17
2	Licht als Wellen- und Teilchenerscheinung	18
2.1	Lernziele	18
2.2	Die Beugung von Licht; Licht als Wellenerscheinung	18
2.3	Der Fotoelektrische Effekt; Licht als Teilchenstrahl	23
2.4	Der Welle/Teilchen-Dualismus von Licht; Antreffwahrscheinlichkeit eines Photons	29
2.5	Übungen mit Lösungen zum Kapitel 2	30
3	Elektronen als Teilchen- und Wellenerscheinung	33
3.1	Lernziele	33
3.2	Kathodenstrahlen; Elektronen mit Teilcheneigenschaften	33
3.3	Linienpektren und Elektronenbeugung; Elektronen mit Welleneigenschaften	34
3.4	Materiewellen	40
3.5	Übungen mit Lösungen zum Kapitel 3	42
4	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse von Kapitel 2 und 3	47
5	Anhang	48
5.1	Zeichen, Einheiten, Konstanten und Formeln	48
5.2	Alles hat seine Wellenlänge	51
5.3	Zitate zur Quantenchemie	54
5.4	Die Schrödinger-Gleichung	56

1 Wellen

1.1 Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

1. wissen, was man unter einer Welle versteht und können Transversal- von Longitudinalwellen unterscheiden.
2. kennen die Begriffe harmonische Welle, harmonischer Oszillator, Wellenlänge λ , Elongation s , Amplitude s_{max} , Schwingungsdauer T , Fortpflanzungsgeschwindigkeit c und Frequenz f .
3. haben den Zusammenhang zwischen der Überlagerung (Interferenz) von Wellen und stehenden Wellen verstanden und können konstruktive von destruktiver Interferenz unterscheiden.
4. können die Besonderheit von schwingungsfähigen Systemen begründen.

1.2 Transversal- und Longitudinalwellen

Eine lange, weiche Schraubenfeder (oder ein Seil, wie ein Vorhang an der Zimmerdecke aufgehängt bzw. auf einem Tisch liegend und an den Enden mit leichter Spannung gehalten; gilt für alle entsprechenden Versuche) wird waagrecht zur Federlänge ausgelenkt und wieder zurückgeführt. Man erkennt, dass sich die Auslenkung (Störung) zeitverschoben längs der Feder fortpflanzt.

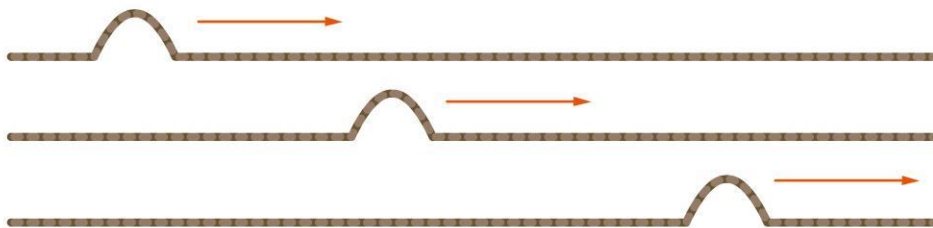


Abb. 1.1 Fortpflanzung einer Störung durch ein Seil

Das gleiche Phänomen lässt sich erzeugen, wenn ein Stein in ruhiges Wasser geworfen wird. Die dadurch verursachte Störung pflanzt sich kreisförmig vom Aufschlagspunkt aus fort.

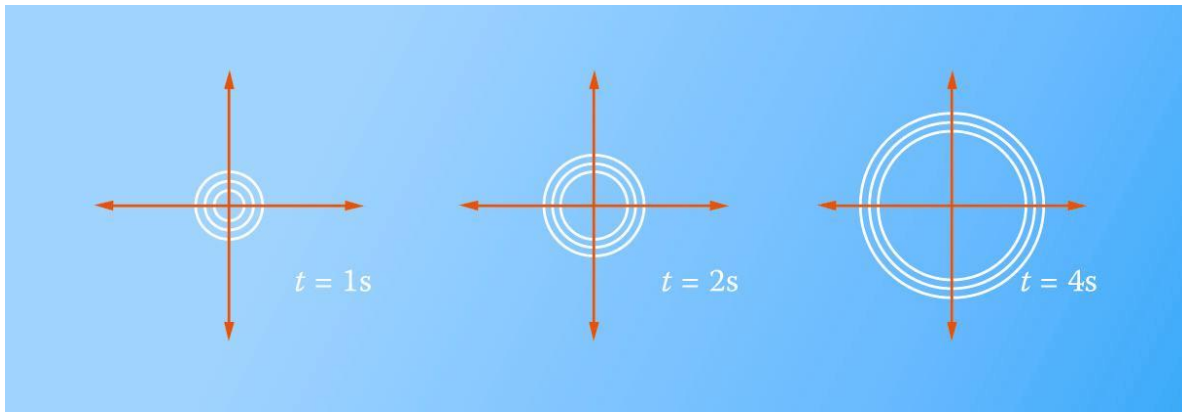


Abb. 1.2 Ausbreitung einer Störung auf einer Wasseroberfläche

Auch eine bestehende homogene Luftdichte lässt sich durch einen Laut stören, der sich als Schall aufgrund von Dichteveränderungen ausbreitet. Dies kann man modellmässig an einer weichen Schraubenfeder zeigen, indem ihr Ende kurz in Richtung der Feder und wieder zurückbewegt wird (Abb. 1.3).

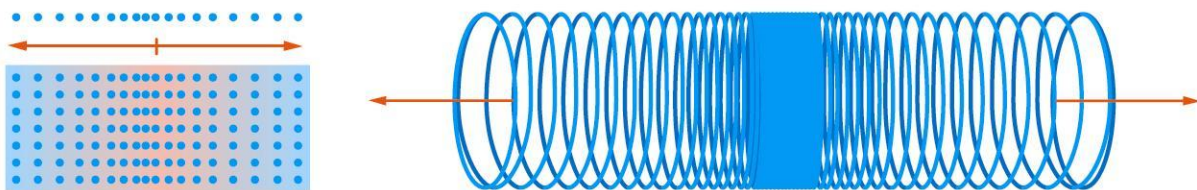


Abb. 1.3 Fortpflanzung von Dichteveränderungen in Luft bzw. modellmässig an einer Feder

Störungen, die sich wie bei den genannten Beispielen von einem Erreger aus fortpflanzen, nennt man Wellen. Da die einzelnen Massenpunkte (Oszillatoren) eines Wellenträgers (Seil, Feder, Wasser, Luft) die Bewegung des Erregers nacheinander ausführen, entsteht der Eindruck einer sich ausbreitenden Welle, obwohl die Teilchen selbst nicht wandern.

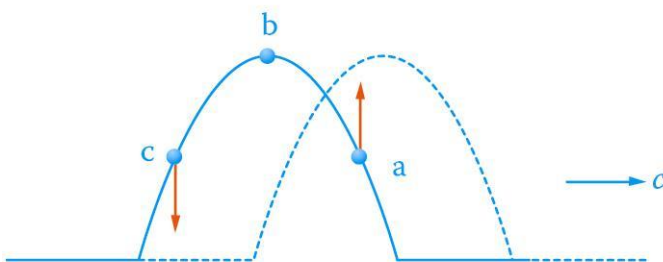


Abb. 1.4 Bewegung von Massenpunkten bei der Fortpflanzung einer Welle durch ein Seil

Störungen können sich auch ohne materiellen Träger ausbreiten. So gelangt z. B. sichtbares Licht von der Sonne auf die Erde. Die „Lichtwellen“ pflanzen sich im luftleeren Raum als elektro-

magnetische Wellen fort. Derartige Wellen (Radiowellen, Mikrowellen, Röntgenstrahlen, sichtbares Licht etc.; Kap. 2) lassen sich durch die Störung homogener elektrischer Felder erzeugen.

Bewegen sich die Massenpunkte (Oszillatoren) wie bei der Auslenkung einer Feder senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, so handelt es sich um Transversalwellen (Querwellen, z. B. Wasserwellen, Abb. 1.2). Bei Longitudinalwellen (Längswellen) liegt die Schwingungsrichtung parallel zur Fortpflanzungsrichtung (z. B. Schallwellen, Longitudinalwelle einer Feder, Abb. 1.3).

Hinsichtlich der Auslenkung der einzelnen Massenpunkte unterscheidet man zwischen momentaner (Elongation, s) und maximaler Auslenkung (Amplitude, $s_{\max}$). Die Schwingungsdauer T gibt an, wie viel Zeit für eine volle Hin- und Herbewegung (volle Schwingung) benötigt wird.

-
- Als Welle bezeichnet man eine von einem Erreger wegwandernde Störung. Erreichen benachbarte Teilchen (Massenpunkte, Oszillatoren) nacheinander dieselbe Auslenkung, so entsteht der Eindruck einer sich ausbreitenden Welle, obwohl die Teilchen selbst nicht wandern.
 - Bei einer Welle unterscheidet man die Bewegungsrichtung der Oszillatoren und die Fortpflanzungsrichtung der Störung. Die Ebene, in der Bewegungs- und Fortpflanzungsrichtung liegen, heisst Schwingungsebene.
 - Bei Transversalwellen (Querwellen) steht die Bewegungsrichtung der Oszillatoren senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung.
 - Bei Longitudinalwellen (Längswellen) sind Bewegungsrichtung der Oszillatoren und Fortpflanzungsrichtung parallel.
 - Elongation: momentane Auslenkung eines Massenpunkts
Zeichen: s Einheit: cm, m ...
 - Amplitude: maximale Auslenkung eines Massenpunkts
Zeichen: $s_{\max}$ Einheit: cm, m ...
 - Schwingungsdauer T : Zeit, die ein Massenpunkt für eine volle Hin- und Herbewegung (volle Schwingung) benötigt.
Zeichen: T Einheit: s, min ...
 - Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Wellenberg oder eine Verdichtung in der Fortpflanzungsrichtung bewegt, ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.
Zeichen: c (für elektromagnetische Wellen entspricht c der Lichtgeschwindigkeit)
Einheit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
-

1.3 Fortlaufende harmonische Wellen

Ein Erreger führt am Ende einer langen, weichen Schraubenfeder eine räumlich und zeitlich gleichmässige (harmonische) Bewegung (Schwingung) aus. Die auf diese Weise erzeugte Störung wandert durch den Wellenträger. Wellenberge und Wellentäler laufen entlang der Feder (Fortpflanzungsrichtung), während die Massenpunkte sich senkrecht dazu bewegen. Das Ergebnis ist eine fortlaufende, harmonische, sinusförmige Transversalwelle (Querwelle).

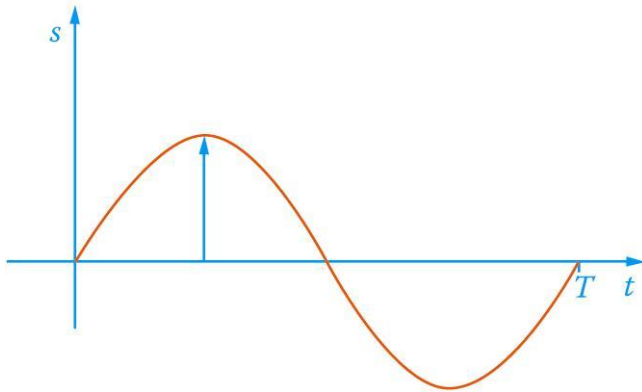


Abb. 1.5 Verlauf der Bewegung eines Erregers, der auf einem Wellenträger eine fortlaufende harmonische Transversalwelle erzeugt. s : Weg; t : Zeit; T : Zeit für eine vollständige Bewegung (Schwingungsdauer)

Das Ende der Schraubenfeder kann auch in Richtung der Feder harmonisch hin und her bewegt werden. Die Störungen pflanzen sich als Verdichtungen und Verdünnungen durch den Wellenträger. Da die Fortpflanzungsrichtung und die Bewegungsrichtung der Massenpunkte (Oszillatoren) parallel zueinander sind, ist eine fortlaufende harmonische Longitudinalwelle (Längswelle) entstanden.

Variiert man die Anzahl Schwingungen des Erregers pro Zeiteinheit, die Frequenz f , so ändert sich auch die Wellenlänge λ (Abstand zwischen zwei gleich schwingenden Oszillatoren), während die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c , die nicht mit der Geschwindigkeit v der Oszillatoren verwechselt werden darf, unverändert bleibt. Hohe Frequenz bedeutet kurze Wellenlänge und umgekehrt.

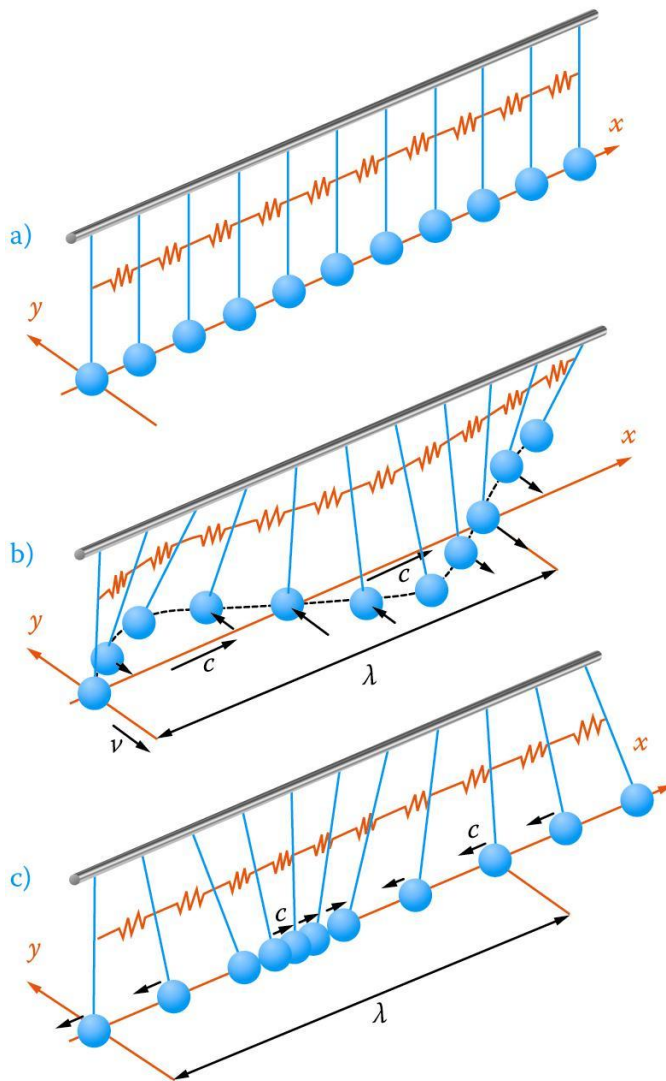


Abb. 1.6 Bildung von fortlaufenden harmonischen Wellen

a) ungestörter Wellenträger

b) Bildung einer harmonischen Transversalwelle

c) Bildung einer harmonischen Longitudinalwelle

c : Fortpflanzungsgeschwindigkeit; v : Geschwindigkeit eines einzelnen Massenpunkts (Oszillator); λ : Wellenlänge

Eine fortlaufende harmonische Welle kann sich auf einer Feder ausbilden, weil die einzelnen Massenpunkte (Oszillatoren) miteinander verknüpft sind (Abb. 1.7). So wird die Bewegung vom Massenpunkt P1 aus zeitverschoben von allen nachfolgenden Oszillatoren ausgeführt. Schließlich, zur Zeit $t = T$ (nach Abschluss einer vollständigen Schwingung des Erregers), bewegen sich die beiden Punkte P1 und P13 simultan (phasengleich) miteinander. Ihr Abstand entspricht der Wellenlänge λ . Dies bedeutet, dass sich während einer Schwingungsdauer T die Welle um eine Wellenlänge fortbewegt. Zu einem späteren Zeitpunkt schwingen die Punkte P2 und P14, P3 und P15 etc. phasengleich.

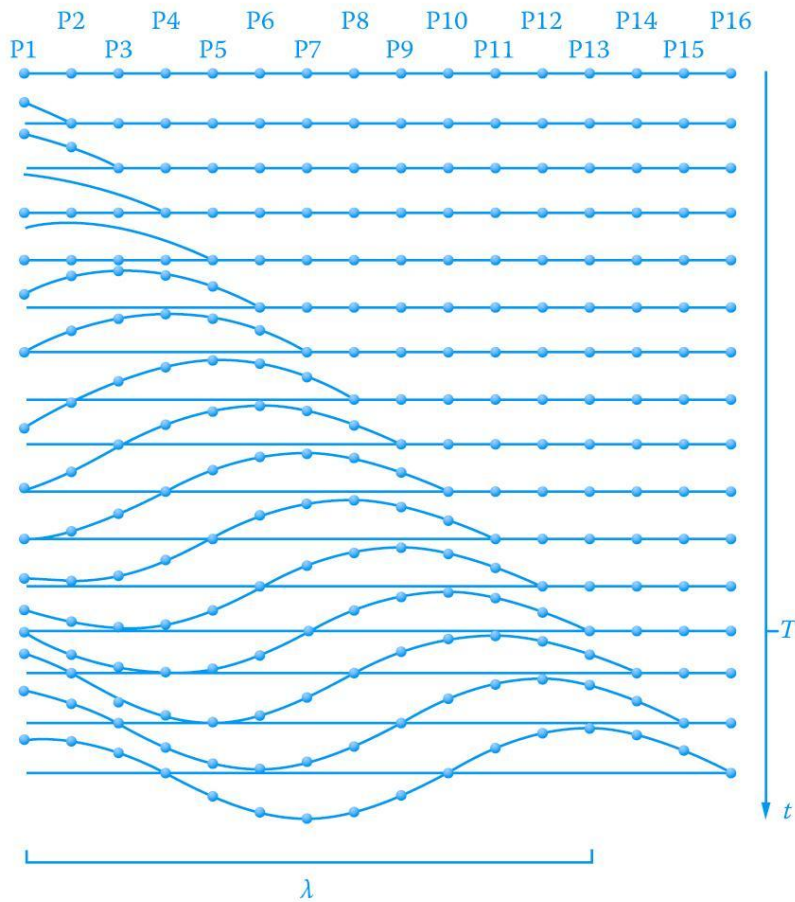


Abb. 1.7 Bildung einer fortlaufenden harmonischen Transversalwelle

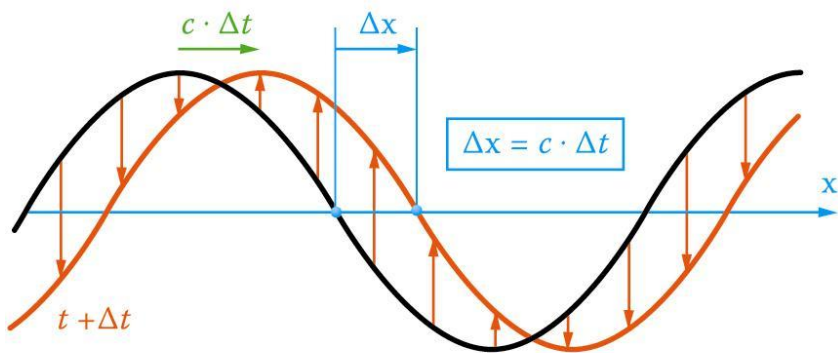


Abb. 1.8 Zwei Momentanbilder einer fortlaufenden harmonischen Transversalwelle zur Zeit t und $t + \Delta t$

Da vom Erreger einer harmonischen Welle dauernd Energie auf den Wellenträger fließt, besitzen die Oszillatoren eine zeitlich konstante Energie E . Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Energie eines harmonisch schwingenden Oszillators direkt proportional dem Produkt aus dem Quadrat der Frequenz f , dem Quadrat der maximalen Auslenkung (Amplitude) $s_{\max}$ und der Masse m ist:

$$E_{\text{Oszillator}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot f^2 \cdot s_{\max}^2 \quad [\text{J}]$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle in einem Wellenträger hängt von dessen Eigenschaften ab.

- Eine Schwingung ist eine Bewegung, die in periodischer Folge um die Gleichgewichtslage (Ruhelage) eines Oszillators erfolgt. Ist die Bewegung des Erregers zeitlich und räumlich gleichmässig (harmonische Schwingung), so entsteht eine harmonische Welle.
- Harmonische Oszillatoren sind Massenpunkte, die harmonische Schwingungen ausführen können.
- Die Frequenz gibt die Anzahl Schwingungen pro Sekunde an:

Zeichen: f Einheit: Hz (Hertz) oder s^{-1}

Verknüpfung: $f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} [s^{-1}]$

- Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Wellenberg oder eine Verdichtung in der Fortpflanzungsrichtung bewegt, ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Zeichen: c (für elektromagnetische Wellen entspricht c der Lichtgeschwindigkeit)

Einheit: $m \cdot s^{-1}$

Fortpflanzungsgeschwindigkeit = Frequenz · Wellenlänge bzw. Wellenlänge/Schwingungsdauer:

$$c = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T} [m \cdot s^{-1}]$$

- Geschwindigkeit eines Oszillators:

Zeichen: v Einheit: $m \cdot s^{-1}$

- Als Wellenlänge wird der kürzeste Abstand zwischen zwei phasengleich schwingenden Oszillatoren bezeichnet (zwei Oszillatoren mit dem gleichen Schwingungszustand: gleiche Elongation s und gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Störung).

Zeichen: λ Einheit: cm, m ...

Verknüpfung: $\lambda = c \cdot T$; $\lambda = \frac{c}{f}$

- Energie eines Oszillators: $E_{\text{Oszillator}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot f^2 \cdot s_{\text{max}}^2 [J; kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}]$

1.4 Die Überlagerung (Interferenz) von Wellen; stehende Wellen

Bewegt man ein Seil an beiden Enden gleichzeitig und gleich weit senkrecht zum Wellenträger auf eine Seite und dann wieder zurück zu den Ausgangspunkten, so kommt es zu einer Überlagerung (Interferenz) der Wellen. Die beiden Störungen laufen aufeinander zu und durchdringen

sich ungestört beim Aufeinandertreffen. Dabei addieren sich die Auslenkungen, die Amplituden verdoppeln sich. Anschliessend pflanzen sich die Störungen wieder mit der ursprünglichen Amplitude fort (Abb. 1.9 a). Wird das Seil an beiden Enden in zwei entgegengesetzte Richtungen gleich weit ausgelenkt, so heben sich die beiden Wellen in der Zeit des Aufeinandertreffens auf (Abb. 1.9.b). Die Addition der Auslenkungen ergibt null. Im ersten Fall spricht man von einer konstruktiven, im zweiten Fall von einer destruktiven Überlagerung (Interferenz).

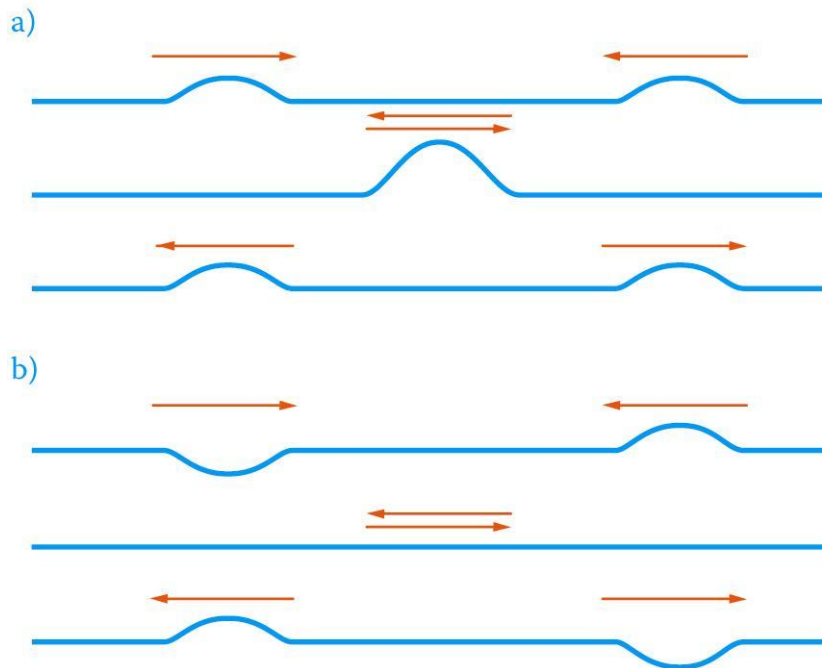


Abb. 1.9 a) konstruktive und b) destruktive Interferenz zweier Wellen

- Laufen zwei Störungen (Wellen) aufeinander zu, so durchdringen sie sich ungestört, sie überlagern sich.
- Bei einer konstruktiven Interferenz verstärken sich die Auslenkungen, während es bei der destruktiven Interferenz bei gleicher Amplitude zu einer Auslöschung kommt.

1.5 Stehende Wellen schwingungsfähiger Systeme

Auf einem Seil (einem Gummischlauch, einer Schraubenfeder) lässt sich durch eine am Ende erzeugte harmonische Schwingung eine harmonisch fortlaufende Transversalwelle erzeugen (Abschnitt 1.2). Ist das andere Ende des Seils fixiert, so wird die Welle reflektiert. Auf diese Weise laufen zwei gleichartige Wellen (gleiche Frequenzen und Amplituden) gegeneinander. Nach kurzer Zeit ist keine wandernde Welle mehr zu erkennen. Aufgrund von konstruktiver und destruktiver Interferenz hat sich eine stehende Welle ausgebildet. Es gibt Orte, an denen die Oszillatoren zu keinem Zeitpunkt ausgelenkt werden. Man nennt diese Stellen (Schwingungs-) Knoten der stehenden Welle. Die dazwischen liegenden Orte heissen (Schwingungs-) Bäuche, an denen die Massenpunkte verschieden stark ausgelenkt werden. Zwischen zwei Knoten, deren Abstand der

halben Wellenlänge λ entspricht, schwingen die Oszillatoren in Phase, rechts und links eines Knotens in Gegenphase.

Abb. 1.10 zeigt das Zustandekommen einer stehenden Welle, die durch Interferenz von zwei entgegengesetzt laufenden harmonischen Wellen zustande kommt.

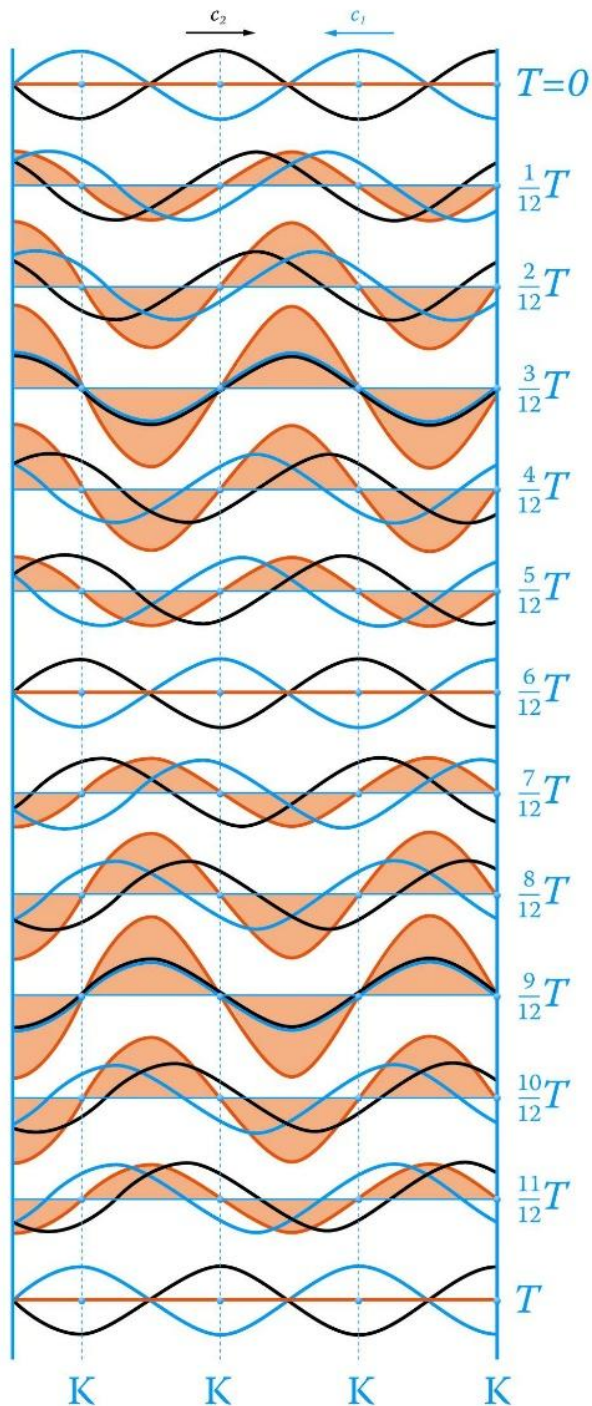


Abb. 1.10 Ausbildung einer stehenden Welle durch zwei entgegengesetzt laufende harmonische Wellen. Die ausgefärbte Kurve entspricht dem Bild der stehenden Welle

$\xrightarrow{c_2}$ und $\xleftarrow{c_1}$

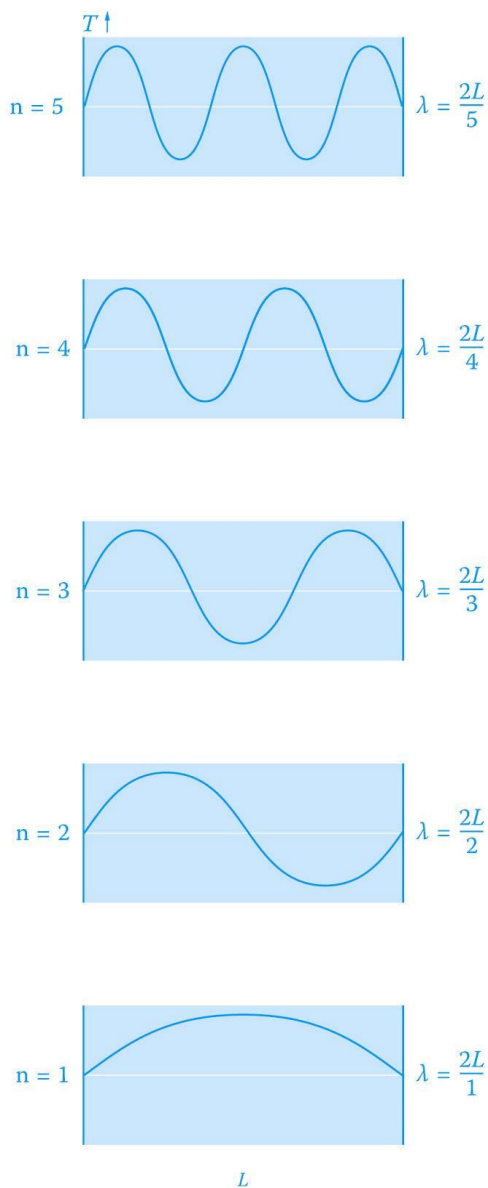
Geschwindigkeit und Richtung der Wellen 1 und 2

-
- Zwei gegeneinander laufende gleichartige (Frequenz, Amplitude) harmonische Wellen bilden aufgrund der Interferenz eine stehende harmonische Welle aus.
 - Die Orte, an denen die Oszillatoren zu keinem Zeitpunkt ausgelenkt werden, nennt man Schwingungsknoten.
 - Zwischen zwei Knoten schwingen Oszillatoren gleichphasig, aber mit unterschiedlichen Amplituden. Die Bereiche zwischen den Schwingungsknoten heissen Schwingungsbäuche.
 - Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche sind ortsfest.
 - Die Oszillatoren besitzen unterschiedliche Energien.
 - Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knoten entspricht der halben Wellenlänge.
-

Mit einer geeigneten Versuchsanordnung lässt sich der Zusammenhang zwischen der Frequenz eines Erregers und den stehenden Wellen eines Gummiseils zeigen. Man befestigt dieses an zwei Stativen und entfernt sie so weit voneinander, dass das Seil leicht gespannt ist. Mithilfe eines kleinen Motors und einer Exzentrerscheibe lässt es sich dann in Schwingung versetzen (Abb. 1.11). Beginnt man mit einer sehr niedrigen Umdrehungszahl, so ist das Seil praktisch vollständig in Ruhe. Die hin und her laufenden Wellen scheinen sich in jedem Augenblick vollkommen auszulöschen (destruktive Interferenz). Bei einer bestimmten Frequenz f_1 ist eine stehende Welle zu beobachten, die aus einem einzigen Schwingungsbauch besteht, mit Knoten an beiden Stativen. Dies ist die erste mögliche Schwingung (harmonische Eigenschwingung, Grundschwingung) des Wellenträgers. Damit ist die Wellenlänge λ gleich der doppelten Seillänge L . Wird die Frequenz weiter erhöht, so ist das Seil wieder in Ruhe. Bei der Frequenz $2 \cdot f_1$ bildet sich die nächste stehende Welle mit einem Knoten in der Mitte des Seils aus. Steigert man die Frequenz, so folgen aufeinander Ruhe, stehende Welle, Ruhe etc. Stehende Wellen auf dem Gummiseil sind nur dann möglich, wenn die Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz f_1 beträgt bzw. die Wellenlänge λ ein ganzzahliger Bruchteil der doppelten Wellenlänge ist: $\lambda = 2L/n$ (n : Nummer des Schwingungszustands). Die Anzahl der Knoten zwischen den Befestigungspunkten entspricht dann $n-1$. Anscheinend kann ein Wellenträger nur ganz bestimmte stehende Wellen, seine Eigenschwingungen, ausbilden.



Abb. 1.11 Versuchsanordnung zur Erzeugung der Eigenschwingungen eines Gummiseils



$$\lambda = 2L/n$$

Abb. 1.12 Mögliche stehende Wellen (Eigenschwingungen) eines Gummiseils sowie die dazugehörigen Wellenlängen λ ; n : Nummer des Schwingungszustands

Neben den Transversalwellen eines Gummiseils oder der Saite eines Streichinstruments lassen sich auf entsprechende Weise Longitudinalwellen als Eigenschwingungen in einer Pfeife (z. B. Orgelpfeife) oder einem Blasinstrument erzeugen.

- Bei gegebenen Randbedingungen können sich auf einem Wellenträger (einem schwingungsfähigen System) nur ganz bestimmte (diskrete) stehende Wellen (Eigenschwingungen) ausbilden.
- Für die Wellenlänge der Eigenschwingungen eines Wellenträgers gilt:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (n: \text{Nummer des Schwingungszustands; } L: \text{Länge des Wellenträgers})$$

Bedingung für diese Beziehung ist, dass die linearen Wellenträger an beiden Enden „geschlossen“ sind, d. h. einen Knoten ausbilden.

Tabelle 1.1 Zusammenhang zwischen Schwingungszustand, Knotenzahl und Wellenlänge eines schwingungsfähigen Systems

Schwingungszustand n	Anzahl Knoten zwischen den Enden des Wellenträgers	Wellenlänge λ
1	0	$\frac{2}{1}L$
2	1	$\frac{2}{2}L$
3	2	$\frac{2}{3}L$
4	3	$\frac{2}{4}L$
:	:	:
:	:	:
n	n-1	$\frac{2}{n}L$

1.6 Übungen mit Lösungen zum Kapitel 1

Übungen

- A 1.1 Eine Wasserwelle hat eine Wellenlänge von 0.02 m. Sie breitet sich mit einer Geschwindigkeit von $c = 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ aus. Mit welcher Frequenz schwingt die Wasser-oberfläche?
- A 1.2 Eine Transversalwelle breitet sich mit der Geschwindigkeit $c = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ aus. Die Frequenz beträgt 0.25 s^{-1} . Wie gross ist die Wellenlänge λ ? Zu welchem Zeitpunkt beginnt ein Oszillator im Abstand von $s = 120 \text{ m}$ zu schwingen?
- A 1.3 Eine Rundfunkwelle hat die Wellenlänge $\lambda = 600 \text{ m}$ und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) aus. Berechnen Sie die Frequenz, mit der der Sender schwingt.
- A 1.4 Was versteht man unter einer harmonischen Welle?
- A 1.5 Eine Gitarrensaite schwingt in ihrem Grundzustand. Die stehende Welle hat somit zwei Schwingungsknoten (Auflagepunkte der Saite). Um wievielfach ist die Schwingungsenergie größer, wenn die Saite mit 4 Schwingungsknoten (einschliesslich der Auflagepunkte und bei gleichbleibender Amplitude) schwingt?
- A 1.6 Wie gross ist der Energieunterschied zweier ansonsten gleicher Schallwellen, wenn die eine die doppelte Amplitude und Wellenlänge hat?
- A 1.7 Schallwellen sind Longitudinalwellen. In welche Richtung schwingen die Luftteilchen, verglichen mit der Fortpflanzungsrichtung?
- A 1.8 Eine 1 m lange Gitarrensaite schwingt. Sie hat insgesamt 5 Wellenknoten (mit den beiden Auflagepunkten der Saite). Welche Wellenlänge hat somit die stehende Welle?

Lösungen

- A 1.1 Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c beträgt $0.12 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$. Die Wellenlänge λ ist 0.02 m . Somit ergibt sich für die Frequenz f :

$$c = f \cdot \lambda \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{0.12 \text{ m}}{0.02 \text{ m} \cdot \text{s}} = 6.00 \text{ s}^{-1}$$

Die Wasserwelle hat eine Frequenz von 6 Hz .

A 1.2 $\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \lambda = \frac{3}{0.25} = 12 \text{ m}$

$$\lambda \cdot t = s \cdot T \Rightarrow t = \frac{s \cdot T}{\lambda}, \text{ mit } T = \frac{1}{f} \Rightarrow t = \frac{s}{f \cdot \lambda} = \frac{120 \text{ m} \cdot \text{s}}{0.25 \cdot 12 \text{ m}} = 40 \text{ s}$$

A 1.3 $c = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2.998 \cdot 10^8 \text{ m}}{600 \text{ m} \cdot \text{s}} = 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$

- A 1.4 Von einer harmonischen Welle spricht man dann, wenn eine Welle durch eine zeitlich und räumlich gleichmässige Störung entsteht.

- A 1.5 Zu Beginn ist der Schwingungszustand der Saite $n = 1$ (Grundzustand). Beim höheren Ton mit vier Schwingungsknoten beträgt der Schwingungszustand $n = 3$.

Die Schwingungsfrequenz des höheren Tones ist 3 mal größer, da die Frequenz indirekt proportional zur Wellenlänge ist ($\lambda = c \cdot T$; für $T = \frac{1}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$).

Mit der dreifachen Frequenz f folgt für E ($E_{\text{Oszillator}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot f^2 \cdot s_{\text{max}}^2$): $3^2 = 9$. Die Energie ist folglich 9 mal grösser.

- A 1.6 Die Energie E ist proportional zu $\frac{s_{\text{max}}^2}{\lambda^2}$ [$E_{\text{Oszillator}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot f^2 \cdot s_{\text{max}}^2$ und $f^2 = \frac{c^2}{\lambda^2}$; c ist konstant]. Mit der doppelten Amplitude s_{max} und der doppelten Wellenlänge λ folgt: $\frac{2^2}{2^2} = 1$. Die Energie ist somit gleich gross.

- A 1.7 Luftteilchen schwingen parallel zur Ausbreitungsrichtung.

- A 1.8 Die Schwingungsknotenanzahl (ohne Auflagepunkte der Saite) $+1$ ergibt den Schwingungszustand von $n = 4$. Mit der Formel $\lambda = \frac{2}{n} \cdot L$ erhält man: $\lambda = \frac{2}{4} \cdot 1 \text{ m} = 0.5 \text{ m}$. Die Saite schwingt mit einer Wellenlänge von einem halben Meter.