Mechanische Schwingungen

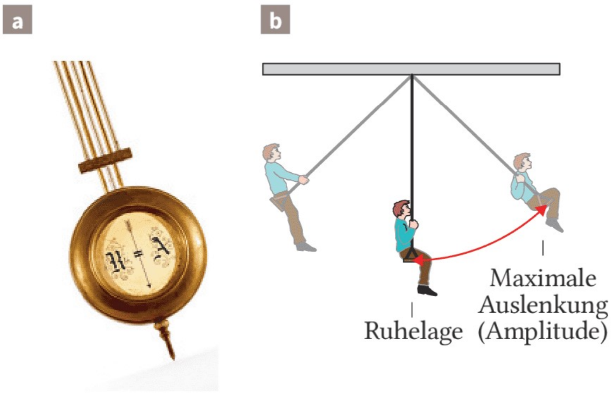
Wird die Saite einer Bassgitarre gezupft, beginnt sie zu schwingen. Daraus entsteht Musik, aber auch die Physik interessiert sich intensiv für Schwingungen. Ihre Gesetzmäßigkeiten lassen sich experimentell erforschen und mathematish beschreiben. Dadurch verstehen wir, wie sich schwingungsfähige Systeme verhalten.

4

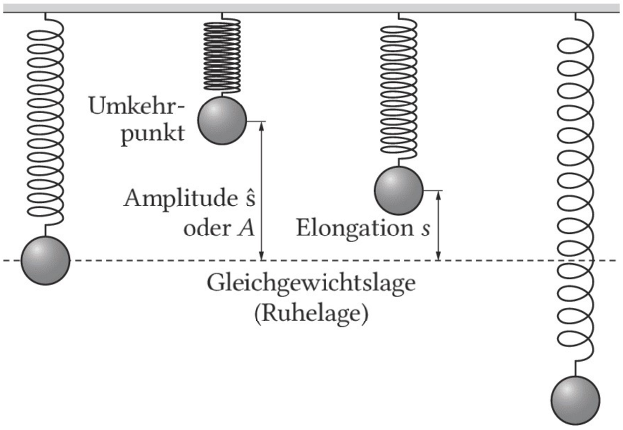
Das können Sie in diesem Kapitel erreichen:

- Sie können Schwingungen mit den charakteristischen Größen Auslenkung, Amplitude, Periodendauer und Frequenz beschreiben.
- Sie können Schwingungsvorgänge visualisieren und aufzeichnen.
- Sie lernen Gesetzmäßigkeiten zur Periodendauer bei verschiedenen Schwingungen kennen.
- Sie lernen den Begriff Resonanz und Beispiele einer sogenannten Resonanzkatastrophe kennen.
- Sie lernen den Umgang mit deduktiven und induktiven Herangehensweisen in der Physik kennen.
- Sie lernen, Überlagerungen von unabhängigen Schwingungen zu beschreiben.

4.1 Mechanische Schwingungen beschreiben



B1 *Beispiele für Schwingungen aus dem Alltag*



B2 *Der Pendelkörper wird aus der Gleichgewichtslage angehoben und losgelassen.*

Schwingungen im Alltag – Schwingungen begegnen uns im Alltag in vielen Situationen, von der Schaukel bis zum Uhrenpendel (Bild **B1**). Alle Schwingungen haben gemeinsame Merkmale:
Ein Körper bewegt sich aus einer stabilen Ausgangs- bzw. **Ruhelage** heraus in eine bestimmte Richtung und wird dann durch eine **rücktreibende Kraft** abgebremst. Durch die andauernde rücktreibende Kraft wird er in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt, sodass er die Ruhelage wieder erreicht. Aufgrund der Trägheit bewegt sich der Körper über die Ruhelage hinaus und alles beginnt von vorne. Dieses Wechselspiel zwischen rücktreibender Kraft und Trägheit kennzeichnet den Bewegungsablauf von Schwingungen.

Zur Beschreibung einer Schwingung sind verschiedene Begriffe notwendig, die anhand eines Beispiels verdeutlicht werden sollen. Bei der Schwingung einer Schaukel (Bild **B1b**) lässt sich die Ruhelage direkt erkennen. Von einer **Auslenkung (Elongation)** s der Schaukel spricht man, wenn sich das Kind auf der Schaukel aus der Ruhelage heraus bewegt. Die Auslenkung kennzeichnet also den Abstand der Schaukel zur Ruhelage, den diese zu einem bestimmten Zeitpunkt hat. Die maximale Auslenkung der Schaukelbewegung aus der Ruhelage wird **Amplitude** A bzw. $\hat{s}$ der Schwingung genannt.

Beim Schaukeln verändert sich also – ausgehend von der Ruhelage – die Auslenkung der Schaukel mit der Zeit. Mit zunehmender Zeit wird die Auslenkung zunächst größer, bis die Amplitude erreicht ist. Dann wird sie bis zur Ruhelage wieder kleiner, um anschließend negative Werte anzunehmen. Ist das Kind schließlich wieder in der Ruhelage angekommen, ist eine Schwingungsperiode abgeschlossen und die Schwingung beginnt erneut. Die Zeitdauer, die das Kind benötigt, um eine komplette Schwingung zu durchlaufen, wird **Periodendauer** T genannt. Die Anzahl der Perioden pro Sekunde nennt man **Frequenz** f der Schwingung. Die Einheit der Frequenz wird in **Hertz** (Hz) angegeben (nach dem Physiker Heinrich HERTZ). Eine Schwingung pro Sekunde entspricht einer Frequenz von einem Hertz (1 Hz). Wird für den kompletten Durchlauf einer Schwingungsperiode z. B. eine halbe Sekunde benötigt, entspricht die Frequenz 2 Perioden pro Sekunde, also 2 Hz. Für die Frequenz f gilt dementsprechend:

$$f = \frac{1}{T} \text{ in Hz.}$$

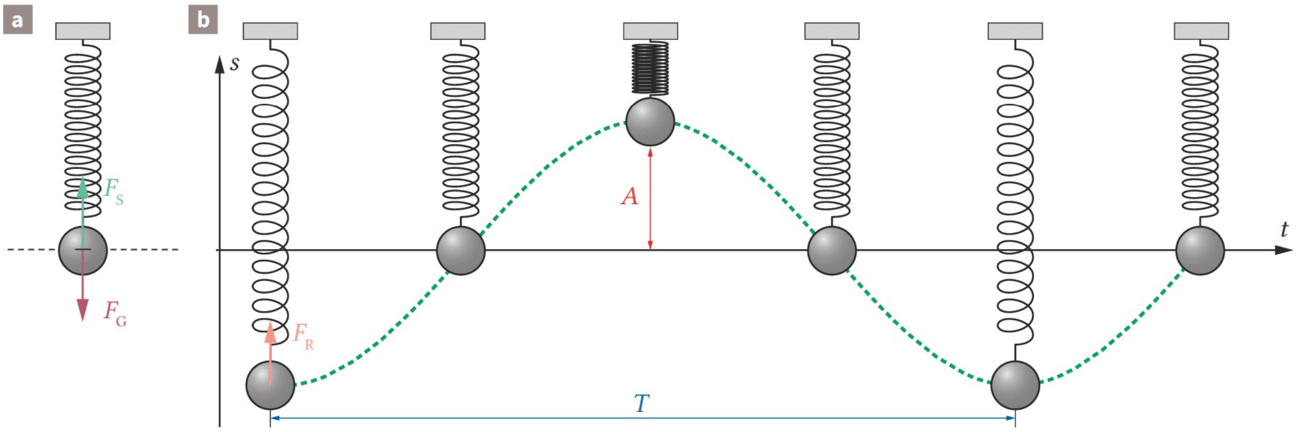
Schwingungen können auch andere Schwingungsrichtungen aufweisen als die in Bild **B1** dargestellten Beispiele. Bei einem **Feder-Masse-Pendel** findet die Schwingung z. B. in vertikaler Richtung statt (Bild **B2**). Das Massestück wird aus der Ruhelage angehoben und losgelassen. Beim Erreichen der Ruhelage hat es die größte Geschwindigkeit. Im tiefsten Punkt kommt es für einen Moment zum Stillstand, um sich dann wieder in entgegengesetzter Richtung zu bewegen.

! Merksatz

Schwingungen lassen sich durch die Amplitude A, die Frequenz f und die Schwingungsdauer T beschreiben. Für die Frequenz f und die Periodendauer T gilt der Zusammenhang:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Die Periodendauer wird in Sekunden gemessen, die Frequenz hat die Einheit 1 Hz (Hertz).



B3 *Darstellung einer Schwingung*

Darstellung von Schwingungsvorgängen – Beim Feder-Masse-Pendel untersuchen wir die Merkmale einer Schwingung genauer (Bild **B3**). Zu Beginn herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen Federspannkraft F_S und Gewichtskraft F_G. Bewegen wir die Kugel aus dieser Gleichgewichtslage nach oben, spüren wir eine Kraft nach unten, bei einer Auslenkung nach unten eine Kraft nach oben. Im ersten Fall überwiegt die Gewichtskraft, im zweiten die Federkraft. Also würde sich die Kugel in beiden Fällen nach dem Loslassen auf die Gleichgewichtslage zu bewegen. Doch aufgrund der Trägheit bewegt sie sich sogar über diese hinaus. Die von nun an nach oben bzw. unten wirkende **Rückstellkraft** F_R (F_G oder F_S) bremst die Kugel ab, bis sie im Umkehrpunkt für einen Moment ruht. Dann wiederholt sich der Vorgang in umgekehrter Richtung. Ein solches Spiel zwischen Rückstellkraft und Trägheit ist charakteristisch für Körper, die eine Schwingung ausführen.

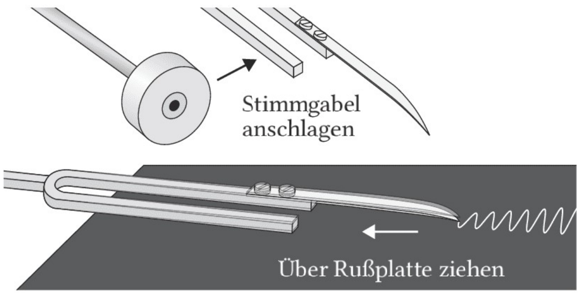
Solchen Schwingungen begegnen wir bereits in der Akustik. Diesen wesentlich schnelleren Schwingungen können unsere Augen nicht mehr folgen. Sie verraten sich aber den Ohren als Ton.

! Merksatz

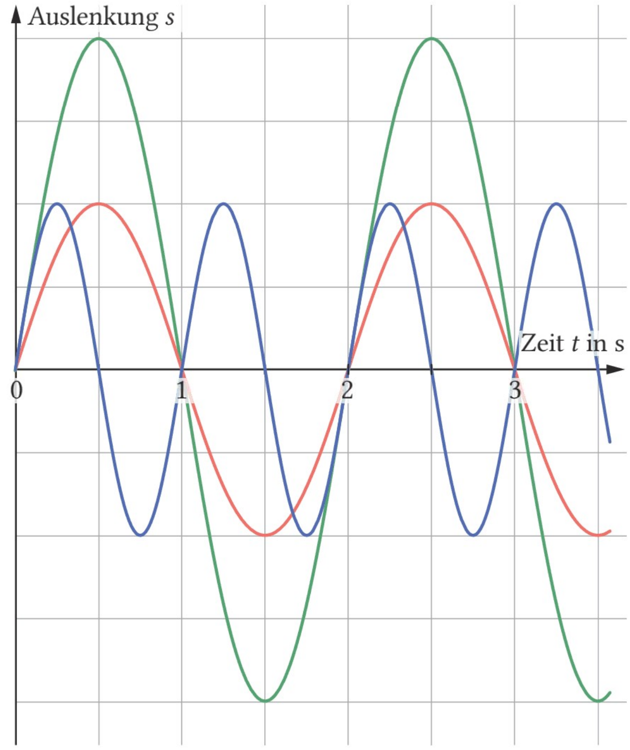
Bewegt sich ein Körper aus einer stabilen Gleichgewichtslage, so tritt eine Rückstellkraft F_R auf, die ihn abbremst, zur Umkehr zwingt und ihn wieder zur Gleichgewichtslage hin beschleunigt. Wegen seiner Trägheit bewegt er sich über die Gleichgewichtslage hinaus. Der Vorgang wiederholt sich. Das Wechselspiel zwischen Rückstellkraft und Trägheit ist charakteristisch für schwingende Körper.

Harmonische Schwingungen – Eine Stimmgabel erzeugt einen Ton. Ihre Zinken zeigen dabei eine besonders gleichmäßige Hin- und Herbewegung. Die in Bild **B4** aufgezeichnete Bewegung klingt allmählich ab. Die anfangs hineingesteckte Energie wird durch Reibung und Abgabe von Schall aus dem System herausgeführt. Die Schwingung ist **gedämpft**. Je schneller sie abklingt, desto stärker ist die Dämpfung.
Ohne Energieverluste würde die Schwingung ewig dauern. Diesen (nie ganz zu verwirklichenden) Idealfall nennt man eine **freie ungedämpfte Schwingung**. Eine Schwingung, deren Weg-Zeit-Diagramm (s-t-Diagramm, siehe Bild **B3b**) eine Sinuskurve ergibt, heißt **harmonische Schwingung**. „Sinustöne“ können wir auch mit einem Lautsprecher erzeugen, den wir an einen Sinusgenerator anschließen. Während die Stimmgabel ihren Rhythmus selbst bestimmt, zwingt der Generator die Lautsprechermembran zu harmonischen Schwingungen mit der jeweils eingestellten Frequenz. Man nennt diese Schwingungen **erzwungene Schwingungen**.

Aus einem s-t-Diagramm einer harmonischen Schwingung (Bild **B3**) können Auslenkung, Amplitude und Periodendauer der Schwingung direkt abgelesen werden.



B4 *Schwingung einer Stimmgabel*



B1 *Unterschiedliche Schwingungen*

Während die Schwingungsfrequenz der Stimmgabel und damit auch die Tonfrequenz durch die Bauart der Stimmgabel festgelegt ist, lässt sich die Frequenz der Lautsprechermembran am Generator einstellen, sodass viele unterschiedliche Tonfrequenzen erzeugt werden können. Bild **B1** zeigt die Sinuskurven von Schwingungen mit unterschiedlicher Frequenz und Amplitude. Während der blaue Graph eine Schwingung mit einer Frequenz von 1 Hz darstellt, kann man am grünen bzw. roten Graphen aus der Periodendauer eine Frequenz von 0,5 Hz ablesen. Die Amplitude der durch den grünen Graphen dargestellten Schwingung ist zudem doppelt so groß wie die Amplitude der Schwingung, die zum roten Graphen gehört.

! Merksatz

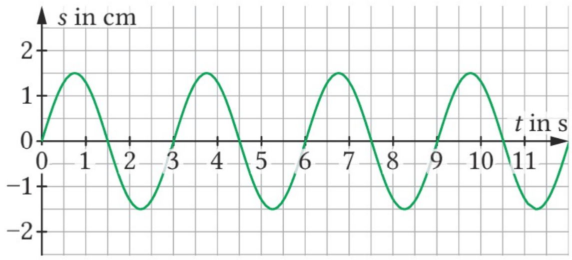
Schwingungen im Alltag sind oft gedämpft, d. h. ihre Amplitude nimmt im Laufe der Zeit ab.
Bei erzwungenen Schwingungen wird dem Schwingungssystem Energie zugeführt. Zeigt das s-t-Diagramm einen Sinuskurve, spricht man von einer harmonischen Schwingung.
Aus dem s-t-Diagramm lassen sich Amplitude und Periodendauer direkt ablesen. Aus der Periodendauer kann die Frequenz ermittelt werden.

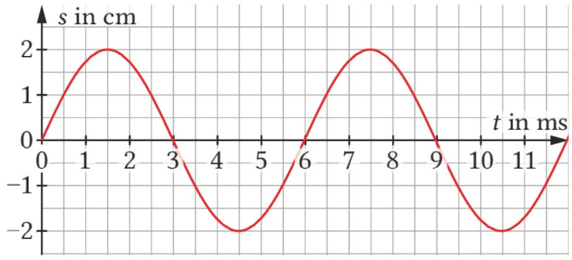
Lösen Sie selbst

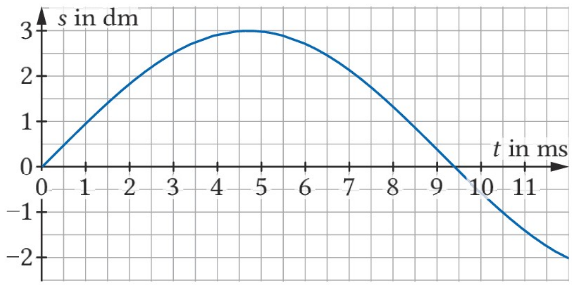
1 Nennen Sie weitere Beispiele für Schwingungsvorgänge, die im Alltag vorkommen, und gehen Sie dabei auch auf die Dämpfung der Bewegung ein.

2 Eine Schaukel auf einem Jahrmarkt benötigt für 5 volle Schwingungen 16 Sekunden. Geben Sie Schwingungsdauer und Frequenz an.

3 Ermitteln Sie für folgende Abbildungen jeweils die charakteristischen Größen der Schwingung.





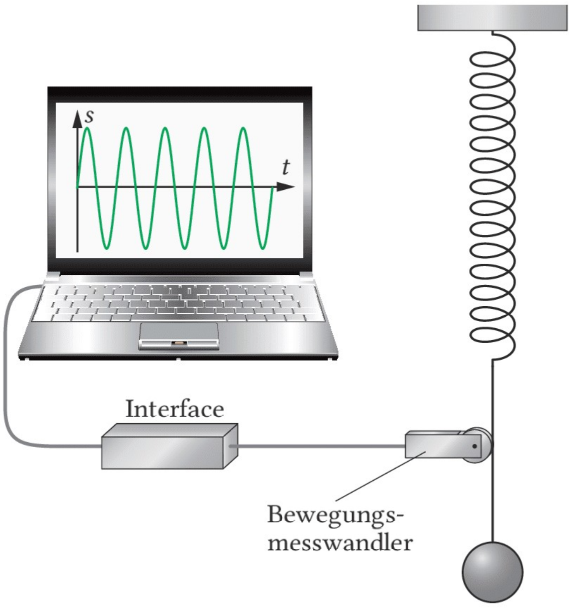


4 Die Schaukel aus Aufgabe 2 hat eine Auslenkung von 2,5 m. Zeichnen Sie einen Verlauf des s-t-Diagramms, wenn die Schaukel bei maximaler Auslenkung beginnt.

5 Erläutern Sie das Prinzip der elektronischen Schwingungsaufzeichnung mit Hilfe eines Messerfassungssystems und eines Computers (Seite 117) und vergleichen Sie dies mit dem mechanischen Schwingungsschreiber (Bild **B4**, Seite 115).

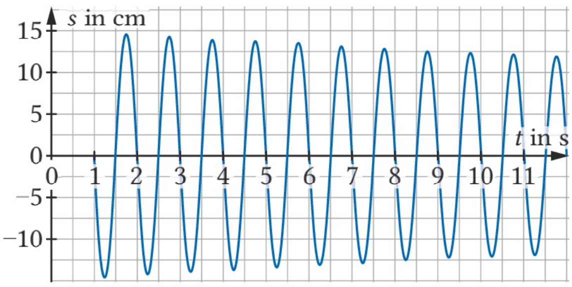
V1 Darstellung von Schwingungen

Eine Feder wird über einen langen Faden mit Massestücken als Pendelkörper verbunden. Der Faden wird über die Rolle eines Bewegungsmesswandlers umgelenkt (Bild **B2**). Das Pendel kann an den Massestücken ausgelenkt und die Amplitude über einen Maßstab abgelesen werden. Befindet sich das Pendel in Bewegung, wird der Schwingungsvorgang über die Drehung des Rades am Bewegungsmesswandler aufgenommen. Die Messdaten werden an den Computer weitergegeben und dort ausgewertet.



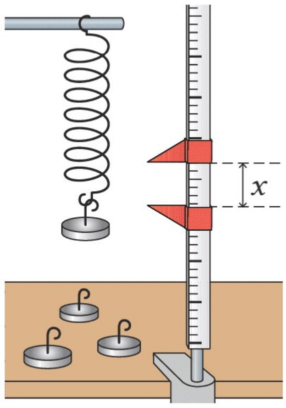
B2 *Feder-Masse-Pendel: Aufzeichnung des Schwingungsvorgangs mit einem Bewegungsmesswandler*

Bild **B3** zeigt das *s*-*t*-Diagramm der aufgezeichneten Daten. Die Amplitude der Schwingung nimmt im zeitlichen Verlauf langsam ab. Die Frequenz der Schwingung bleibt über den gesamten Schwingungsvorgang allerdings konstant. Es ist eine schwach gedämpfte Schwingung.



B3 *s-t-Diagramm des Feder-Masse-Pendels*

V2 Das hookesche Gesetz



Für eine Stahlfeder wird die Federkraft F in Abhängigkeit von der Verlängerung x der Feder bestimmt. Man hängt an die entspannte Feder verschiedene Massestücke und senkt diese langsam ab, so dass die Feder nicht zu schwingen beginnt. In der neuen Lage wirkt die Federkraft nach oben, der Gewichtskraft entgegen. Tabelle **T1** zeigt die Messwerte für die Verlängerung x und die zugehörige Kraft F sowie den Quotienten aus beiden Größen. Dieser ist konstant und wird als **Federhärte** oder **Federkonstante *D*** bezeichnet. Die Federkraft F nimmt proportional zur Verlängerung x zu.

F in cN	0	100	200	300	400
x in cm	0,0	5,1	10,1	15,2	20,0
$\frac{F}{x}$ in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$	-	19,6	19,8	19,7	20,0

T1 *Nachweis der Proportionalität $F \sim x$*

Dieses lineare Kraftgesetz mit dem Proportionalitätsfaktor D nennt man **hookesches Gesetz:**

$$F = D \cdot x.$$

In den *F*-*x*-Diagrammen für zwei unterschiedliche Federn und ein Gummiband erkennt man, dass das hookesche Gesetz nicht für alle elastischen Materialien gültig ist. Auch für Federn gilt es nur in einem gewissen Bereich. Federpendel, deren Federn dem hookeschen Gesetz genügen, zeigen einen sinusförmigen, also harmonischen Schwingungsverlauf.