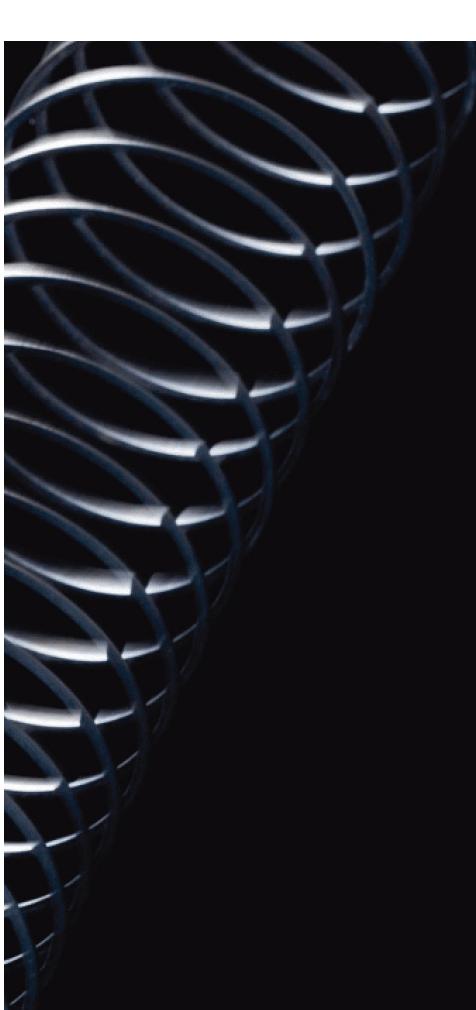


Mechanische Wellen

Wellen umgeben uns. Als Schallwellen übertragen sie Musik und der Doppeleffekt verblüfft uns immer wieder. Als Wasserwellen können wir sie beobachten, als Erdbebenwellen entfalten sie große Zerstörungskraft, ebenso als Tsunami, der eine Küste überrollt.

Die Physik interessiert sich besonders für die Überlagerung von Wellen und die Interferenzen, die dabei auftreten. Außerdem widmet sie sich ausführlich dem Phänomen der „eingesperrten“, sprich: der stehenden Welle.





5

Das können Sie in diesem Kapitel erreichen:

- Sie lernen, Wellen zu beschreiben und ihre charakteristischen Größe zu bestimmen.
- Sie lernen, welche unterschiedlichen Reflexionen am Ende eines Wellenträgers auftreten können.
- Sie erfahren neue Erkenntnisse zu Überlagerungen von Wellen im eindimensionalen Raum.
- Sie beobachten das Phänomen der stehenden Welle.
- Sie bestimmen die Eigenschwingung und die Resonanz von Körpern.
- Sie untersuchen den Dopplereffekt im Alltag.

5.1 Wellen – fortschreitende Störungen



B1 a) Ebene Wellen auf einem See, b) Kreiswellen in einer Pfütze, c) La Ola im Fußballstadion

Wellen umgeben uns. Die Erscheinungsformen von Wellen sind sehr verschieden. Wellen auf einem See (Bild **B1a**) oder in einer Pfütze, auf die Regen prasselt (Bild **B1b**), sind gut zu erkennen. Ohne Schallwellen wäre die Erde still und ohne elektromagnetische Wellen (**Kapitel 6**) auch das Smartphone. Erdbebenwellen können furchtbare Schäden anrichten, aber auch so schwach sein, dass nur Messgeräte sie registrieren.

Trotzdem haben Wellen viel gemeinsam. Jeder kennt *La Ola*, die besonders bei Sportveranstaltungen beliebt ist (Bild **B1c**): Irgendwo im Rund eines Stadions reißen Zuschauer die Arme hoch und stehen dabei auf. Ihre Nachbarn lassen sich von der Begeisterung anstecken und führen daraufhin die gleiche Bewegung aus, deren Nachbarn ebenso und so weiter. Innerhalb weniger Sekunden läuft diese Welle einmal um das ganze Stadion. Jeder Zuschauer hat dabei an seinem Platz die „Begeisterungsschwingung“ mitgemacht. Notwendig waren der Blickkontakt mit den Nachbarn und das selbstständige Nachahmen.

Eine wandernde Störung – Wesentliche Eigenschaften einer mechanischen Welle sieht man an einer Wellenmaschine wie in Versuch **V1a**. Das nach oben gerissene Körperchen (**Oszillator**) verlässt seine Gleichgewichtslage. Da die Körperchen elastisch gekoppelt sind, wandert diese Querstörung mit konstanter Geschwindigkeit nach rechts. Wir nennen diese nach oben ausgelenkte Störung einen **Wellenberg**.

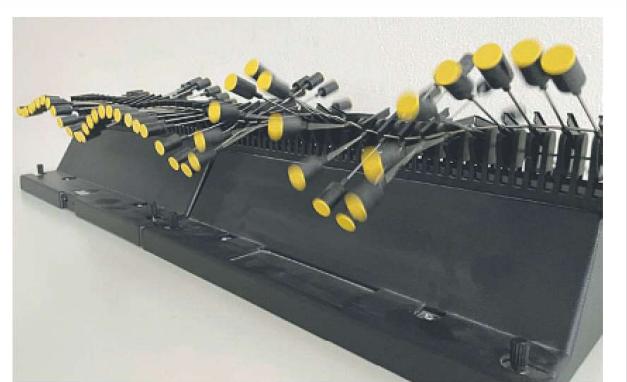
In Bild **B2a** ist eine Momentaufnahme festgehalten, die drei Körperchen der Wellenmaschine zeigt:

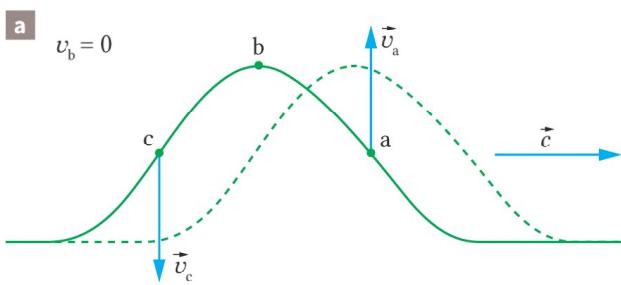
- Das Körperchen „a“ ist soeben erst von der Störung nach oben erfasst worden und bewegt sich mit der Teilchengeschwindigkeit \vec{v}_a nach oben.
- Körperchen „b“ hat die Bewegung nach oben schon hinter sich und besitzt bereits seinen Höchstausschlag – es steht für einen Augenblick still.
- Das Körperchen „c“ hat den Höchstausschlag schon hinter sich und bewegt sich gerade mit der Teilchengeschwindigkeit \vec{v}_c zurück.

V1 Wellenmaschine

Bei der Wellenmaschine sind Körperchen (hier gelb) elastisch gekoppelt. Wird das erste Teilchen ausgelenkt, führt das nächste Teilchen dieselbe Bewegung aus usw. Wegen der Trägheit der Körperchen erfolgt dies zeitversetzt.

- a) Man lenkt das erste Körperchen der Wellenmaschine nach oben aus und führt es anschließend gleich wieder in seine ursprüngliche Lage zurück.
- b) Anschließend lenkt man das erste Körperchen der Wellenmaschine zuerst nach unten aus und führt es dann wieder zurück.



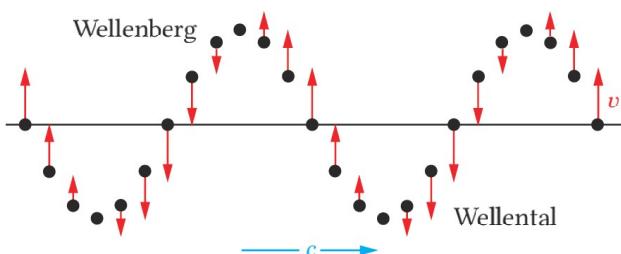


B2 a) Momentaufnahme eines Wellenbergs: Teilchen „a“ ist gerade von einer Störung erfasst worden, Teilchen „c“ hat diese schon hinter sich. b) Bei einem Wellental sind die Verhältnisse gerade gespiegelt.

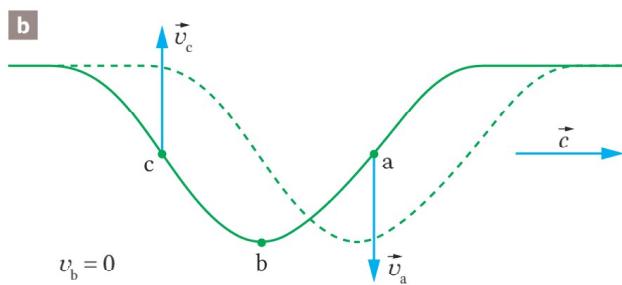
Im Versuch **V1b** lenkt man das erste Körperchen nach unten aus und es entsteht ein **Wellental**, also eine Ausbuchtung nach unten, die als Störung über den Träger läuft. Dieses Wellental ist das Spiegelbild eines Wellenberges bezüglich des Spannbandes (Bild **B2b**). Deshalb zeigen beim Wellental in Bild **B2b** die vorderen *Teilchenvektoren* nach unten, die hinteren nach oben.

Durch eine Hin- und Herbewegung des ersten Körperchen erzeugt man also eine Schwingung (Berge und Täler). Jede Phase dieser erzwungenen Schwingung wird nach und nach von den anderen Körperchen übernommen (Bild **B3**).

Schnelle und Geschwindigkeit – In den Versuchen **V1a** und **V2b** breitet sich eine Welle aus. Dabei kommen die Körperchen aber nicht von der Stelle; sie schwingen lediglich senkrecht zur Fortschreibungsrichtung des Wellenberges einmal nach oben und dann wieder zurück. Ihre Momentangeschwindigkeit, die sich bei der Hin- und Herbewegung dauernd ändert, bezeichnet man als **Schnelle** \vec{v} . Dieser besondere Name soll den Unterschied zur konstanten **Ausbreitungsgeschwindigkeit** \vec{c} der Störung hervorheben. Die Vektoren \vec{v} und \vec{c} stehen hierbei orthogonal zueinander (Bild **B3**). Man nennt diese Welle daher auch eine **Transversalwelle** (Querwelle).



B3 Schnelle bei Wellenberg und -tal. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Geschwindigkeit v . Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit werden durch c dargestellt.



Die Schnellepfeile an der Vorderseite des Wellentals sind stets nach unten, an seiner Rückseite dagegen nach oben gerichtet sind. Beim Wellenberg ist es umgekehrt (Bild **B3**).

Ausbreitungsgeschwindigkeit – Wovon hängt nun die Geschwindigkeit c ab, mit der die Querstörung wandert? Je weicher die elastischen Bänder sind, mit denen die Körperchen untereinander gekoppelt sind, desto schwächer wird die Kraft auf das jeweilige Nachbarkörperchen; desto kleiner ist dann auch dessen Beschleunigung. Dies folgt aus der Grundgleichung der Mechanik $a = \frac{F}{m}$. Aus ihr folgt auch, dass die Beschleunigung der Körperchen mit zunehmender Masse abnimmt. Eine Querstörung breitet sich demnach umso langsamer aus, je kleiner die Kopplungskräfte zwischen benachbarten Körperchen sind und je größer deren Masse ist.

Energietransport – Der Versuch **V1** lässt sich auch so deuten: Mit der Auslenkung des ersten Körperchens wurde eine Energieportion in die Wellenmaschine gesteckt. Sie tritt zu Beginn in Form von Spannenergie des Bandstückes zwischen den beiden ersten Stäben auf. Anschließend verwandelt sie sich zum einen Teil in Bewegungsenergie des zweiten Körperchens, zum anderen in Spannenergie des nachfolgenden Bandstückes usw.

Die in die Wellenmaschine gesteckte Energieportion läuft also als Spann- und Bewegungsenergie durch den Wellenträger weiter, bis zum letzten Körperchen.

! Merksatz

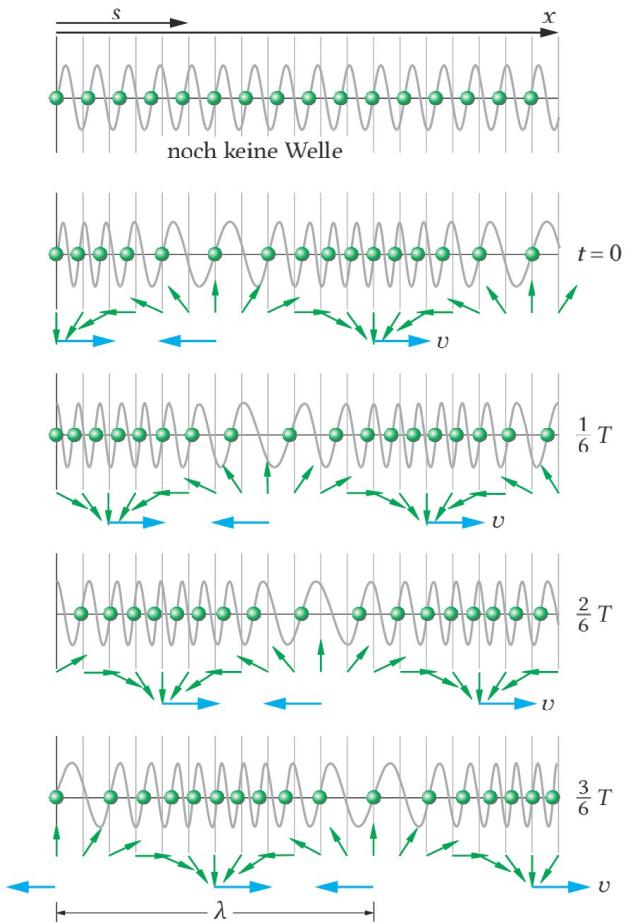
Bei einer mechanischen Welle führt ein Körperchen (Oszillator) nach dem anderen die Bewegung aus, die ihm vom Erreger vorgeschrieben wird.

Mit der Welle werden Energie, Impuls und Informationen transportiert, nicht aber Materie.

5.2 Längs- und Querwellen

Längswellen beim Rangierbahnhof – Auf einem Rangierbahnhof wird ein Güterzug zusammengestellt. Wenn ein neu hinzukommender Wagen auf die Reihe der schon bereitstehenden Wagen stößt, geht ein Ruck von vorne bis hinten durch den ganzen Zug.

Wir ahmen dies in Versuch **V1** nach und lenken den linken Wagen der „Eisenbahn“ nach rechts aus. Dabei drückt er die nachfolgende Feder etwas zusammen, der zweite Wagen erfährt so eine Kraft nach rechts. Wegen seiner Trägheit wechselt dieser jedoch nicht augenblicklich in seine neue Lage; vielmehr vergeht eine gewisse Zeit, bis er ebenso weit nach rechts ausgelenkt ist wie der erste Wagen. Nach und nach rücken alle weiteren Wagen nach rechts. Gibt man einer auf den Tisch gelegten Feder einen Schubs nach rechts, so wandert auch bei dieser Feder eine solche „Verdichtungs“-Störung von links nach rechts. Zieht man dagegen ruckartig an der ersten Windung, so wandert eine „Verdünnung“ nach rechts. Bewegt man die erste Windung harmonisch hin und her, so erzeugt man eine harmonische **Längswelle** in Bild **B1** – auch **Longitudinalwelle** genannt.



B1 Längswelle bei Auslenkungen und Schnellen v parallel zu c

Bei einer Längswelle schwingen die Teilchen längs der Ausbreitungsrichtung. Deshalb wandern in Versuch **V2** abwechselnd Verdichtung und Verdünnung nach rechts durch die Schraubenfeder. Die Elongationen sind jetzt die Projektionen der jeweiligen Zeiger auf die in x -Richtung liegende s -Achse. Die blauen Vektoren in Bild **B1** markieren die Stellen größter Schnelle in positiver und negativer Richtung. Die Schnelle ist der Elongation immer um eine viertel Wellenlänge voraus (entspricht dem Phasenvorsprung $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$).

! Merksatz

Bei einer fortschreitenden Längswelle schwingen die Teilchen des Trägers mit der Frequenz $f_{\text{längs}}$ der Ausbreitungsrichtung c hin und zurück.

V1 Längswellen bei Eisenbahnwagen



Einige kleine Wagen sind hintereinander aufgestellt und durch elastische Stahlfedern gegenseitig verbunden. Lenken wir jetzt den ersten Wagen nach rechts oder links aus, so werden die übrigen nacheinander um ein Stückchen nach rechts bzw. links verschoben. Je größer die Masse der Wagen ist und je weicher die Stahlfedern sind, desto langsamer wandert diese Längsstörung durch die Wagenkette.

V2 Wellen bei Federn

Eine lange Feder liegt auf dem Boden. An ihrem Anfang bewegt man sie einmal kurz vor und zurück, also längs der Federachse.



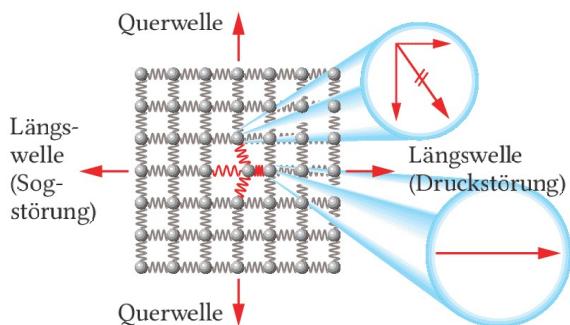
Diese longitudinale Störung läuft nach und nach durch die ganze Feder. Nun bewegen wir die Feder kurz auf und ab, also quer zu der Federachse.



Exkurs: Wellen in der Natur

Längs- und Querwellen

Mechanische Wellen brauchen zur Ausbreitung einen Träger. Er besteht aus einzelnen Teilchen, die durch elastische Kräfte miteinander verbunden sind. Bei festen Körpern wirken die auftretenden Kräfte so, als seien die einzelnen Teilchen durch elastische Federn nach allen drei Raumrichtungen verbunden.

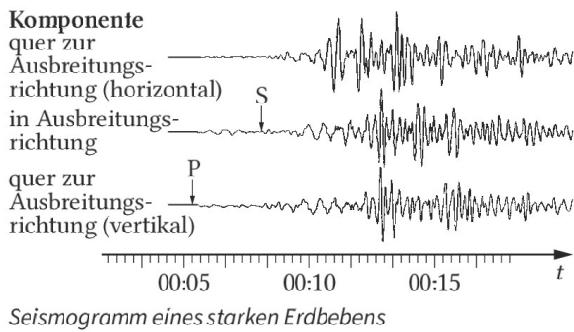


Wird nun ein Teilchen aus seiner Gleichgewichtslage etwas nach rechts ausgelenkt, entsteht eine große Kraft auf das rechts neben ihm liegende Teilchen. Dieses wird stark beschleunigt. So entsteht eine Längsstörung mit großer Ausbreitungsgeschwindigkeit nach rechts (nach links entsprechend).

Wegen der allseitigen Kopplung der Teilchen kommt aber auch eine Querstörung zustande. Das Teilchen über dem ausgelenkten erfährt eine Kraft nach rechts unten. Diese liefert eine kleine Komponente nach rechts und führt so zu einer nach oben schreitenden Querstörung (nach unten entsprechend), und zwar mit kleinerer Ausbreitungsgeschwindigkeit.

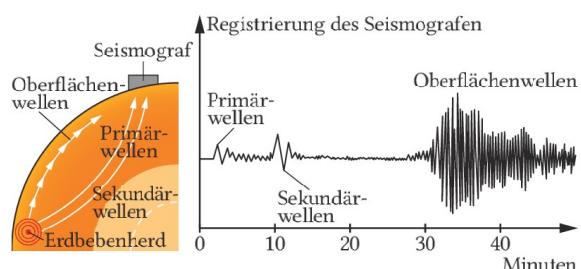
Erdbebenwellen

Der Herd eines Erdbebens kann bis zu einigen hundert Kilometern unter der Erdoberfläche liegen. Von dort breiten sich mechanische Längs- und Querwellen nach allen Richtungen durch das Erdinnere aus. Sie werden in mehreren Hundert Erdbebenstationen, die über die ganze Welt verstreut sind, durch sogenannte **Seismografen** aufgezeichnet. Ein solches Gerät besteht aus einem Körper mit sehr großer Masse, der – wie ein Pendel – möglichst leicht beweglich aufgehängt ist. Wegen seiner Trägheit bleibt er auch bei schnellen Bodenerschütterungen fast ganz in Ruhe. Die so entstehende Relativbewegung Erde-Körper wird elektronisch verstärkt und zu **Seismogrammen** digital weiterverarbeitet.



Seismogramme enthalten wichtige Informationen: Da sich Längswellen (**Primärwellen**) in einem festen Körper schneller ausbreiten als Querwellen (**Sekundärwellen**), treffen die beiden mit einer gewissen Zeitdifferenz bei der Erdbebenwarte ein. Je größer diese Zeitdifferenz ist, desto größer ist die Entfernung zum Zentrum des Bebens. Noch später treffen die an der Oberfläche entlanglaufenden Querwellen ein (**Oberflächenwellen** oder **Love-Wellen** nach ihrem Entdecker A. E. H. Love). Sie bewirken die größten Zerstörungen in bebauten Gebieten.

Die Geschwindigkeit der Längs- und Querwellen hängt von den elastischen Eigenschaften des Erdmaterials ab. Deshalb liefern Seismogramme Informationen über Festigkeit und Dichte vom Erdinnern.



Durchlaufen Erdbebenwellen auf dem Weg vom Erdbebenherd zum Seismografen Schichten, die tiefer als etwa 2900 km in der Erde liegen, so kommen am Seismografen nur noch Längswellen an.

Noch nie ist eine Querwelle beobachtet worden, die größere Tiefen durchsetzt hätte. Daraus schließt man auf einen Erdkern, der in dieser Tiefe beginnt und sich wie eine Flüssigkeit verhält.