

## ■ Exkurs: Riesenwelle aus dem Nichts

Am 11. März 2011 ereignete sich eine verheerende Katastrophe in der Küstenregion um Japan. Die Nachrichten überschlugen sich: Ein **Tsunami** habe mit unvorstellbarer Wucht die Ostküste von Japan überrollt – eine Fläche von über 500 km<sup>2</sup> – und dabei ganze Städte dem Erdboden gleich gemacht.

Im Laufe kürzester Zeit kamen geschätzt rund 22 000 Menschen ums Leben, ca. 600 000 Menschen wurden vom Tsunami betroffen.



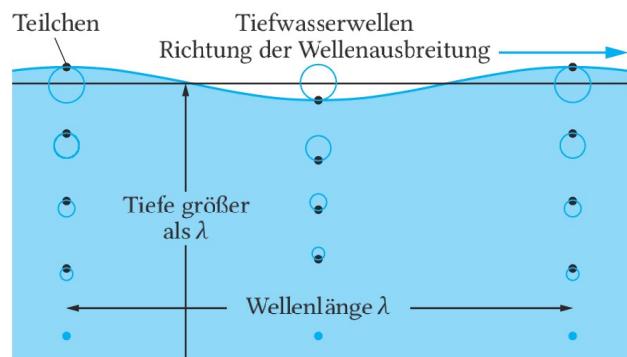
Im Lauf der Erdgeschichte kam es schon häufiger zu solchen Katastrophen, ohne dass die Menschen sie auf eine gemeinsame Ursache zurückführen konnten – sie waren unerklärliches Schicksal. So wurde im November 1755 die portugiesische Hauptstadt Lissabon von einem Brand zerstört, der in Folge eines Erdbebens ausbrach. Die Einwohner flüchteten vor den Flammen an das Ufer des Tejo. Dort überraschten sie haushohe Flutwellen. Tragischerweise verloren dabei 60 000 Menschen ihr Leben, die sich schon gerettet sahen.

Diese früher unerklärliche, plötzlich wie aus dem Nichts auftauchende Riesenwelle zeigte ihre zerstörerische Energie vor allem in den wie Trichter wirkenden Buchten und Hafenbecken, insbesondere in Japan mit seiner steilen Tiefseeküste. Doch die Fischer dort hatten draußen auf hoher See von einer Welle überhaupt nichts gespürt. Sie nannten sie deshalb „Tsunami“ – „Welle im Hafen“.

Um einen Tsunami zu verstehen, muss man sich auch mit anderen Wasserwellen beschäftigen. Es gibt die kleinen, auseinanderlaufenden und flacher werdenden Kreise um die Einschlagstelle eines Tropfens auf ruhender Oberfläche. Sie entstehen durch die Ober-

flächenspannung. Beim genauen Hinschauen erkennt man meist einige Kreise, die andere Kreise überholen.

Von anderen, windgetriebenen und gewaltigeren Wellen lassen wir uns im Urlaub durchschaukeln. Nahe am Strand überschlagen sich die Wellenberge, es entsteht die Meeresbrandung. Weit draußen, über tiefem Wasser, führt das Wasser an der Oberfläche kreisförmige Bewegungen aus und regt dabei benachbarte Bereiche zur gleichen Bewegung an. Die Amplitude kann hier groß werden, mehr als 10 m. Mit zunehmender Tiefe werden die Kreise kleiner, bis sie ganz verschwinden. In der Tiefe bleibt das Wasser ruhig. Man nennt diese an der Oberfläche über der ruhigen Tiefe entstandenen Wellen „**Tiefwasserwellen**“.



Tiefwasserwellen haben Pkw-Geschwindigkeiten (etwa 10 bis 100  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ). Ihre Wellenlängen sind klein im Vergleich zur Wassertiefe. Sie liegen bei 100 bis 200 m, die Periodendauern betragen etwa 4 bis 70 s. Normalerweise laufen auch diese Tiefwasserwellen mit der Zeit auseinander: Die Wellenberge werden niedriger und teilen sich auf. Der Grund dafür ist, dass jeder geformte Wellenzug endlicher Länge als eine Überlagerung von sehr vielen sinusförmigen Teilwellen mit jeweils unterschiedlicher Wellenlänge aufgefasst werden kann. Wasserwellen mit unterschiedlicher Wellenlänge haben verschiedene Geschwindigkeiten (Dispersion), sodass in einiger Entfernung alle Teilschwingungen außer Takt geraten sind und sich gegenseitig auslöschen.

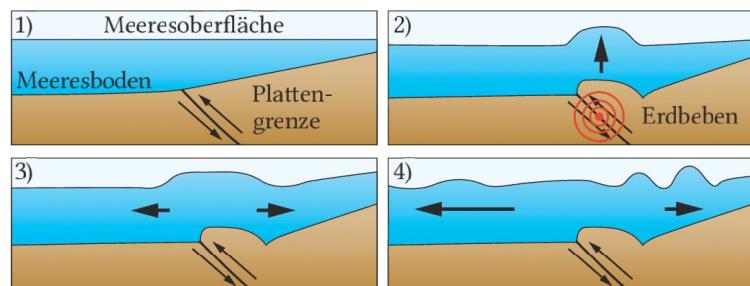
Bei Tsunamis trifft dies alles nicht zu. Am häufigsten entstehen sie im Pazifischen Ozean. Es gibt sie aber auch in vielen anderen Meeresgebieten.

## Entstehung und Ausbreitung

Der Ausgangspunkt eines Tsunamis ist zumeist ein Erdbeben aufgrund einer plötzlichen Verschiebung übereinander gleitender Platten der Erdkruste wie am 11.3.2011 vor der japanischen Sanriku-Küste in etwa 25 km Tiefe (Bild B1). Dort bewegt sich die Pazifische Platte mit einer Geschwindigkeit von rund 83 mm pro Jahr in Bezug auf die Nordamerikanische Platte westwärts. Bei dem Beben riss die Erdkruste innerhalb weniger Minuten auf einer Länge von 400 km auf. Es kam zu Plattenbewegungen von bis zu 27 m horizontal und 7 m vertikal.

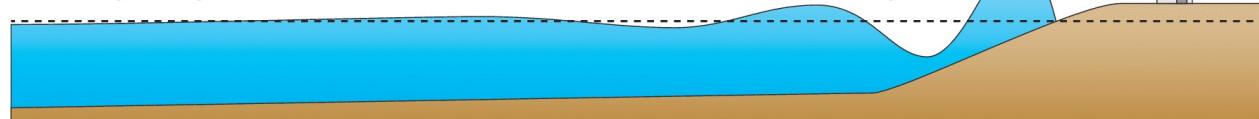
Durch ein solches Beben hebt sich der Meeresboden über hunderte von Kilometern um mehrere Meter. Nach dem plötzlichen Anheben sinken die Wassermengen wieder nach unten. Da Wasser nicht gestaucht werden kann, verbreitert sich die Säule und drückt so das umgebende Wasser nach oben. Es entsteht eine Wellenbewegung, bei der auch im tiefsten Ozean die gesamte Wassersäule bis zum Meeresboden mitschwingt. Man spricht von einer *Flachwasserwelle* (Bild B2).

Normalerweise läuft ein Wellenberg wegen der Dispersion, also dem Auseinanderlaufen der an der Welle beteiligten Teilwellen, mit der Zeit auseinander. Unter bestimmten Bedingungen entsteht ein entgegengesetzter Effekt. Dann erreicht die Welle z. B. im Wellenberg eine größere Geschwindigkeit als im Wellental. Die Wellenfront wird steiler. Man kennt dies von Brandungswellen.



**B1** Ursache eines Tsunamis ist meist ein Erdbeben unter dem Meer als Folge einer Plattenverschiebung in der Erdkruste.

Amplitude klein  
Wellenlänge sehr groß

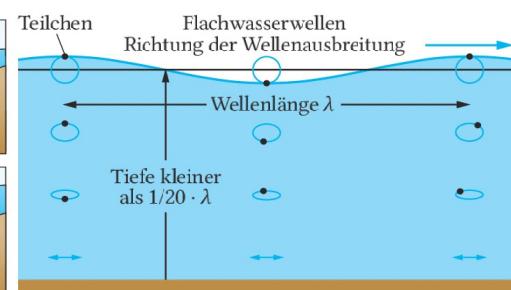


**B3** Veränderung von Wellenlänge und Amplitude bei Annäherung an die flacher werdende Küste

Das Steilerwerden und das Auseinanderlaufen (Dispersion) einer Welle können sich aufheben, sodass die Wellenform erhalten bleibt, ein **Soliton** ist entstanden. Tsunamis sind solitonische Flachwasserwellen.

Die Geschwindigkeit von Tsunamis berechnet sich wie bei normalen Flachwasserwellen mit  $c = \sqrt{g \cdot h}$ . Sie beträgt bei einer Meerestiefe von 5000 m etwa  $800 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ! Die sehr große Geschwindigkeit führt trotz sehr kleiner Frequenz zu sehr großen Wellenlängen bis über 300 km, v. a. auch in Relation zur Meerestiefe – deshalb verhalten sich Tsunamis wie „Flachwasserwellen“. Die Amplitude ist sehr gering, manchmal nur wenige Dezimeter, sodass die Wellenbewegung von Schiffen gar nicht wahrgenommen wird.

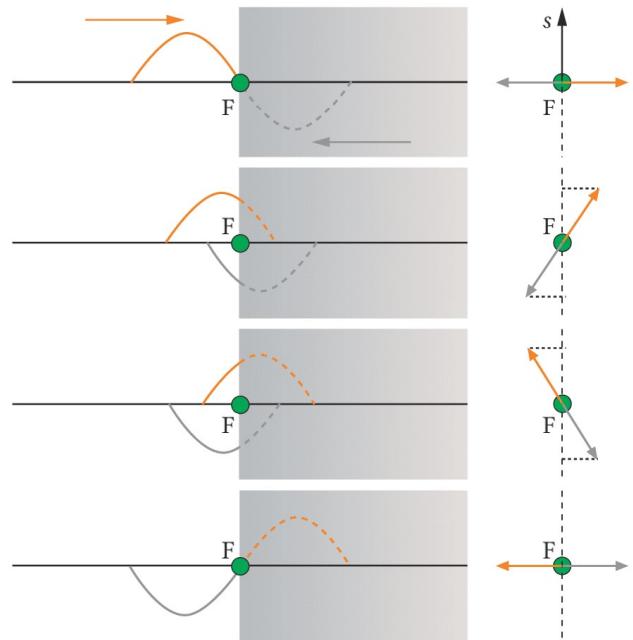
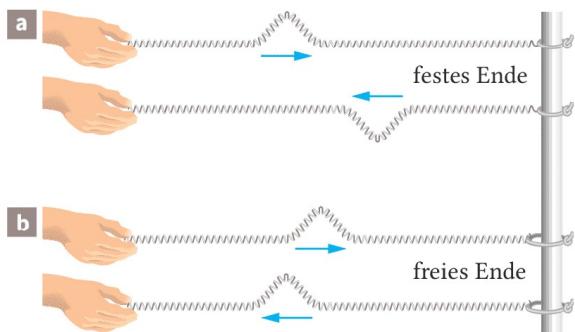
In Küstennähe reduziert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit abnehmender Wassertiefe  $h$ . Gemäß  $c = \lambda \cdot f$  wird die Welle zu deutlich kleinerer Wellenlänge gestaucht (Bild B3). Wenn nun ein breiter Wellenberg sich senkt, muss er zum Ausgleich einen schmalen Wellenberg höher „quetschen“, nur so kann dieser die Höhenenergie vom breiten Wellenberg übernehmen. Die Wellenberge klettern deshalb in Küstennähe auf Höhen bis zu 50 m an. Das rasche Auftürmen von Wasser auf große Höhen erfordert aber auch einen starken horizontalen Wasserstrom. So rasen schließlich zerstörerische Wassermassen über die Küste hinweg.



**B2** Bei Flachwasserwellen schwingt die ganze Wassersäule.

## 5.6 Reflexion mechanischer Wellen

### V1 Reflexion von Federwellen

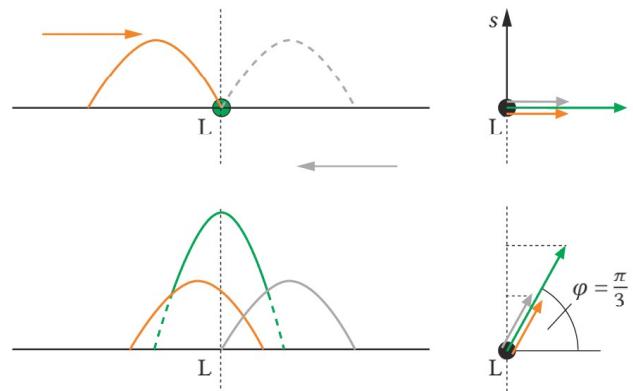


**B1** Reflexion am festen Ende *F*

**Reflexion von Transversalwellen –** Wie sich eine Welle am Ende des Ausbreitungsmediums verhält, wird vom letzten Oszillatoren beeinflusst (Versuch **V1**): Ist das Ende der Feder fixiert und kann sich nicht frei bewegen, verhält sich die Welle anders als bei einem frei beweglichen Ende. Diese Beobachtung trifft nicht nur auf transversale Wellen, sondern auch auf longitudinale Wellen zu (Versuch **V2**).

**Reflexion am festen Ende:** Das nach oben ausgeschwungene vorletzte Teilchen in Versuch **V1a** des Wellenträgers kann das letzte Teilchen nicht hochreißen, dieses sitzt fest in der Wand (Bild **B1**). Die Wand übt jetzt auf das vorletzte Teilchen eine Reaktion aus. Dieses wird nach unten gezogen und schwingt wegen seiner Trägheit über die Gleichgewichtslage hinaus. Die Wand wirkt so ständig wie ein „stiller“ Erreger (mit gleicher Frequenz). Er erzeugt eine zurücklaufende „Echowelle“. Jeder ankommende Berg wird mit einem Tal beantwortet und umgekehrt: Beide heben sich am festen Ende „F“ ständig auf. „F“ ist ein Knoten. Für Zeichnungen ist z. B. folgende Vorstellung hilfreich: Es ist so, als käme von rechts aus einer Spiegelwelt ebenfalls eine Welle auf die Wand zu, aber statt eines Wellenberges ein Wellental – wie bei einer Punktspiegelung (Bild **B1**). Gleichzeitig mit dem Wellenberg von links trafe es am festen Ende ein und beide würden sich deshalb dort auslöschen. Am festen Ende ist diese gedachte Schwingung also immer gegenphasig zur ankommenden Störung ( $\Delta\varphi = \pi$ ).

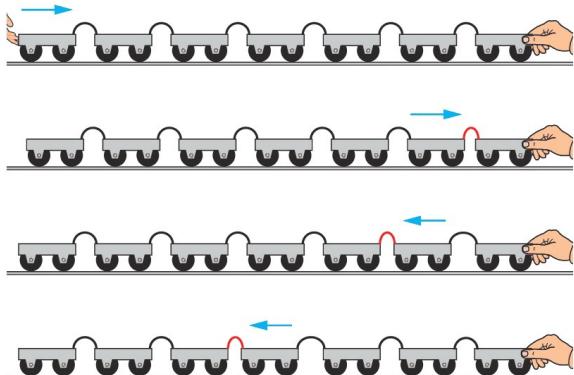
**Reflexion am freien (losen) Ende:** Hier wird eine Störung ebenfalls reflektiert (**V1b**). Das freie Ende des Trägers muss kein weiteres Teilchen mitreißen. Wegen seiner Trägheit schwingt es über die Elongation einer ankommenden Störung um deren Betrag hinaus. So reißt es selbst wieder das vorletzte Teilchen nach oben und wird zum Ausgangspunkt eines nach links laufenden Wellenbergs (grau in Bild **B2**). Aus der Spiegelwelt in Bild **B2** kommt also eine zweite Störung von rechts auf das lose Ende „L“ zugelaufen. Beide überlagern sich am freien Ende. Die Elongation ist dort jetzt besonders groß. Bei „L“ entsteht ein Bauch. Nach der Überlagerung läuft die von rechts kommende Störung weiter nach links, so als wäre nichts gewesen. Hier überlagern sich an- und entgegenkommende Welle phasengleich ( $\Delta\varphi = 0$ ).



**B2** Reflexion am freien (losen) Ende *L*; Phasenzeiger oben  $\varphi = 0$  und unten  $\varphi = \frac{\pi}{3}$

## V2 Reflexion von Longitudinalwellen

Wagen auf einer Schiene werden mit identischen Federn gekoppelt. Der rechte Wagen wird festgehalten, so dass die Wagenkette ein festes Ende aufweist. Der erste Wagen wird in Richtung des Pfeils angestoßen.



**B3** Die Störung wird am rechten, festen Ende reflektiert.

**Reflexion von Longitudinalwellen –** Die Reflexion von Longitudinalwellen wird in Versuch **V2** mit gekoppelten Wagen näher untersucht. Wird der erste Wagen kurz nach rechts ausgelenkt, so wandert die Störung bis zum vorletzten Wagen. Dieser drückt die letzte Feder zusammen und wird dann zurückgeworfen (Bild **B3**). Es entsteht eine nach links gerichtete Elongation, die wieder zurückläuft. Die Änderung der Auslenkung von „rechts“ nach „links“ wird als **Phasensprung** bezeichnet.

Die Reflexion am losen Ende, die man bei Transversalwellen beobachtet, ist auch hier erkennbar. Ist eine Rechtsauslenkung am Ende der Kette angekommen, so schießt jetzt der letzte Wagen wegen seiner Trägheit über seine Gleichgewichtslage hinaus, reißt dabei den vorletzten Wagen mit, dieser den vorvorletzten usw. Die nach rechts gerichtete Auslenkung wandert als eine nach rechts gerichtete Auslenkung wieder zurück. Es findet somit kein Phasensprung statt.

### Merksatz

Am Ende des Trägermediums wird eine Störung reflektiert. Liegt ein loses Ende vor, so werden Schnelle und Auslenkung ohne Phasensprung reflektiert. Bei einem festen Ende erfolgt ein Phasensprung: Ein Berg wird als Tal reflektiert und umgekehrt.

## Abiturvorbereitung

Auf einem geradlinigen Träger der Länge 15 cm breitet sich eine Querwelle mit der Geschwindigkeit  $4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  von links nach rechts aus. Das erste Teilchen beginnt zur Zeit  $t = 0 \text{ s}$  mit einer harmonischen Schwingung nach unten. Ihre Frequenz beträgt 1,0 Hz, die Amplitude ist 1,5 cm.

- Das rechte Ende des Trägers ist frei. Zeichnen Sie ein Momentbild der Welle, die zur Zeit  $t = 5,0 \text{ s}$  durch die Überlagerung der ursprünglichen und der reflektierten Welle entstanden ist.
- Nun sei das rechte Ende des Trägers fest. Wie sieht dann die Welle zur Zeit  $t = 5,0 \text{ s}$  aus?

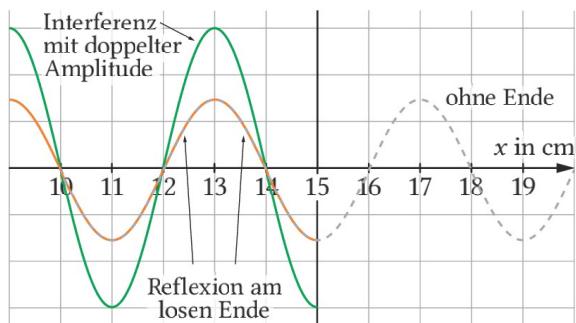
*Lösung:*

- Wo ist die Wellenfront? Aus  $v = \frac{s}{t}$  folgt  $x_1 = 4 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 5,0 \text{ s} = 20 \text{ cm}$ . Wie groß ist die Wellenlänge? Aus  $c = \lambda \cdot f$  folgt  $\lambda = \frac{4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{1 \text{ Hz}} = 4 \text{ cm}$ .

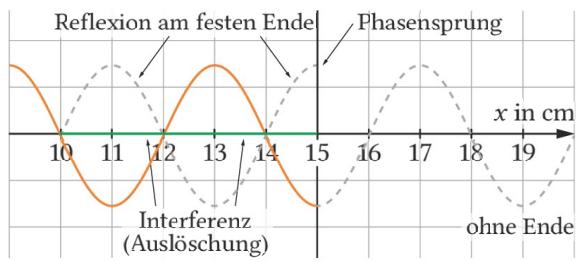
Die Schnelle des ersten Teilchens zeigt nach unten!

$$s(x; 5,0 \text{ s}) = -1,5 \sin\left(2\pi\left(\frac{5 \text{ s}}{1 \text{ s}} - \frac{x}{4 \text{ cm}}\right)\right)$$

Der Teil über das Ende bei 15 cm wird nur gestrichelt eingezeichnet. Dann zeichnet man die Reflexion am losen Ende ohne Phasensprung ein (Achsenspiegelung). Anschließend addiert man die beiden Graphen zur Interferenz (rot).



- Wie in Teil a), jedoch mit Phasensprung (Punktspiegelung). Es kommt zur Auslöschung!



## 5.7 Stehende Wellen



**B1** Stehende Welle am Flammenrohr

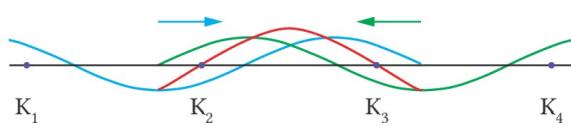
**Interferenz entgegenlaufender Wellen –** Auf einem Wellenträger laufen zwei Wellen mit der gleichen Wellenlänge und der gleichen Amplitude entgegen (z.B. durch Reflexion). In Versuch **V1** wird dies an einer Wellenmaschine demonstriert. Nach kurzer Zeit ergibt sich ein überraschendes Bild: Die zwei einzelnen Wellen sind verschwunden. Stattdessen erscheint eine einzige resultierende Welle; sie scheint stehen geblieben zu sein – eine **stehende Welle**. Eigentlich ist es gar keine richtige Welle mehr, denn man sieht weder nach rechts noch nach links einen bestimmten Phasenzustand wandern.

### V1 Stehende Welle

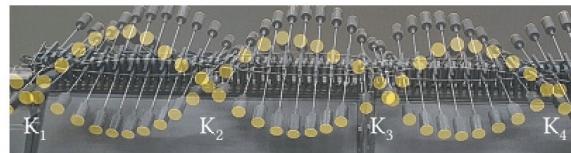
Auf der Wellenmaschine laufen zwei Wellen (blau und grün) aufeinander zu.



Sie überlagern sich, es kommt zur Interferenz der beiden Wellen (rot).



Nach kurzer Zeit ist eine „stehende Welle“ entstanden.

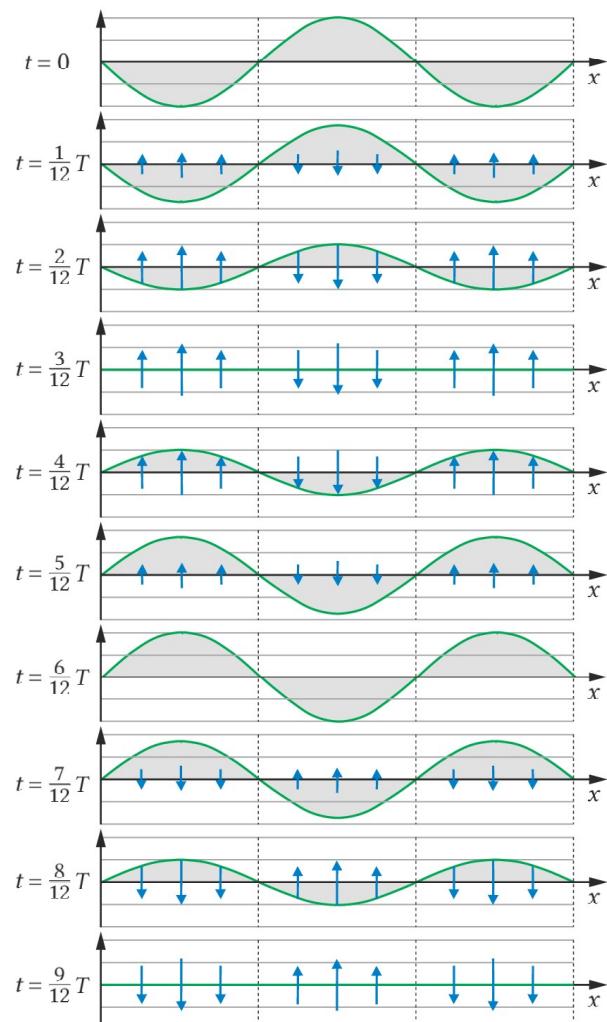


**B2** Stehende Welle mit 4 Knoten an zwei festen Enden

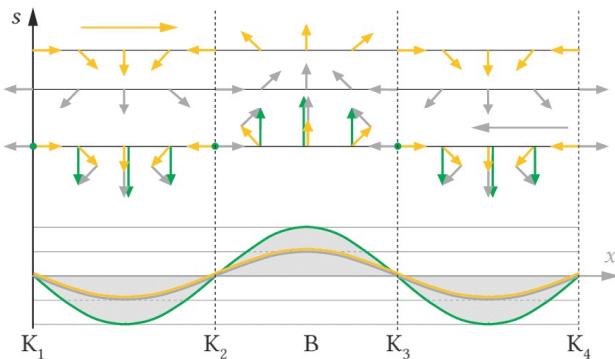
An vier Stellen („Knoten“  $K_1$  bis  $K_4$ ) bewegen sich die Körperchen gar nicht mehr. Zwischen  $K_1$  und  $K_2$  schwingen alle Körperchen phasengleich, aber mit unterschiedlicher Amplitude. In der Mitte ist die Amplitude maximal. Zwischen  $K_2$  und  $K_3$  bzw.  $K_3$  und  $K_4$  beobachtet man das Gleiche.

### Merkmale stehender Wellen:

- Die **Schwingungsknoten** sind Stellen auf dem Wellenträger, an denen die Körperchen dauerhaft nicht mehr schwingen. Der Abstand benachbarter Knoten beträgt eine halbe Wellenlänge.
- Zwischen diesen festliegenden Knoten schaukelt der Träger an Ort und Stelle auf und ab. Dabei schwingen alle Punkte zwischen zwei benachbarten Knoten in gleicher Phase, d.h. sie erreichen gleichzeitig ihr Maximum und gehen gleichzeitig durch die Nulllage. Ihre Amplituden sind jedoch verschieden groß.
- Die Punkte in der Mitte zwischen zwei Knoten schwingen am weitesten aus. Man nennt diese Stellen (und ihre direkte Umgebung) **Schwingungsbäuche**. Links und rechts eines Knotens schwingen die Teilchen gegenphasig. Dies gilt dann auch für die Körperchen benachbarter Schwingungsbäuche.



**B3** Stehende Welle zweier gleicher entgegenlaufender Wellen



**B4** Die gelbe und die graue Welle überlagern sich zur grünen Welle zum Zeitpunkt  $t = \frac{0}{12} T = 0$ .

**Die Schnelle bei der stehenden Welle** – Für eine einzelne Schwingung gilt:

- Bei maximaler Elongation ist die Schnelle null,
- bei der Elongation null ist die Schnelle maximal.

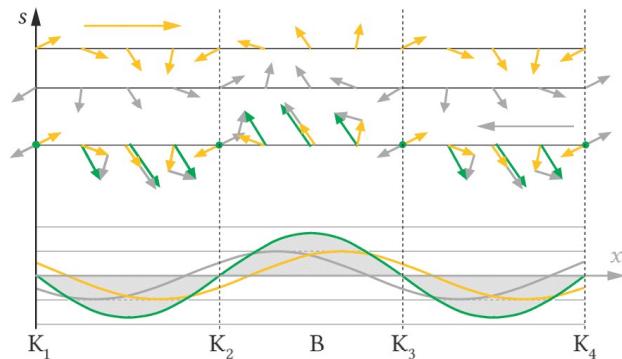
Für die nebeneinanderliegenden Schwingungen der stehenden Welle gilt dies ebenso. Im Moment maximaler Elongation bei  $t = 0$  in Bild **B3** ist der Träger kurzzeitig in Ruhe und besitzt keine Bewegungsenergie, dagegen maximale Elongationsenergie.

Eine Viertel Periode später verschwinden sämtliche Elongationen gleichzeitig. Jetzt herrscht an allen Orten die jeweils dort maximal erreichbare Schnelle [ $t = \frac{3}{12} T$ ]. Der Träger besitzt keine Elongationsenergie mehr, dafür aber maximale Bewegungsenergie.

Nach einer halben Schwingungsdauer [ $t = \frac{6}{12} T$ ] ist überall wieder die jeweils maximale Elongation in umgekehrter Richtung entstanden, alle Teilchen der Welle ruhen. Genau eine viertel Schwingungsdauer später [ $t = \frac{9}{12} T$ ] sind wieder sämtliche Elongationen verschwunden, die Schnelle hat wieder maximalen Betrag.

**Zeiger liefern die Erklärung.** Man kann die nach rechts laufende Welle mit Zeigern als Momentaufnahme darstellen (Bild **B4**, gelb). Jeder nachfolgende Zeiger ist noch nicht so weit gegen den Uhrzeigersinn gedreht wie der jeweils vorhergehende. Bei der nach links laufenden Welle (Bild **B4**, grau) kommen alle Zeiger der gelben Welle auch vor, aber genau in umgekehrter Reihenfolge – eben von rechts nach links.

Anders als bei gleichlaufenden Wellen haben die Zeiger der ersten Welle und ihre jeweiligen Partner der zweiten Welle hier nicht überall dieselbe Phasendifferenz. Vielmehr sind die Phasendifferenzen benachbarter Zeigerpaare verschieden und deshalb auch die resultierende Amplitude. Die Phasendifferenz (und damit die resul-



**B5** Die gelbe und die graue Welle überlagern sich zur grünen Welle zum Zeitpunkt  $t = \frac{1}{12} T$ .

tierende Amplitude) bleibt aber für einen bestimmten Ort *dauerhaft* erhalten: Am festen Ort drehen sich die Schwingungszeiger beider Wellen stets mit gleicher Winkelgeschwindigkeit und gleicher Länge gegen den Uhrzeigersinn; an jedem Ort ist ja bei beiden Wellen eine normale Sinusschwingung vorhanden.

Betrachtet man das Ergebnis an einigen markanten Stellen, so ergeben sich folgende Beobachtungen:

- a) An der Stelle  $K_2$  in Bild **B4** entsteht ein Schwingungsknoten. Der gelbe Zeiger ist um  $\pi$  phasenverschoben gegenüber dem grauen Zeiger. Bild **B5** zeigt, dass diese Phasendifferenz dauerhaft  $\pi$  bleibt.
- b) An der Stelle  $B$  genau in der Mitte zwischen  $K_2$  und  $K_3$  entsteht wegen der bleibenden Phasendifferenz ein Schwingungsbauch. Die beiden Zeiger sind dort phasengleich. Man sieht rechts und links im Abstand  $\frac{\lambda}{2}$  genau das gleiche, wenn auch mit entgegengesetzter Phase.
- c) Rechts und links in der Nähe von  $B$  zeigt die Momentaufnahme in Bild **B4**, dass alle Teilchen in Phase zum Schwingungsbauch schwingen (alle grünen Zeiger sind parallel), allerdings mit kleineren Amplituden.

### ! Merksatz

Die Interferenz zweier einander auf demselben Träger entgegenlaufender gleichartiger Wellen mit gleicher Amplitude  $\hat{s}$  und Wellenlänge  $\lambda$  ergibt eine stehende Welle.

- Sie schaukelt zwischen den Schwingungsknoten auf und ab.
- Der Abstand zweier benachbarter Schwingungsknoten ist  $\frac{\lambda}{2}$ .
- Alle Teilchen zwischen benachbarten Schwingungsknoten schwingen phasengleich.