minærva

PL 2 SKRIPT Wellen

Erklärskript

Die Aufgaben 22–36 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Physik-LK – Abitur 2027

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts und der Abiturvorbereitung verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe PL · Physik-Leistungsfach zum Abitur 2027

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen und Aufgaben zu jedem Abschnitt, Formeltraining und Aufgaben im Stil des Abiturs, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Physik PL1–PL5, das Lernskript PL-Σ und Mathe ML1–ML3 enthalten den Stoff, aber keine Aufgaben.
Aufgabenskripte	Je Fach eines mit den Übungsaufgaben. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es je Fach nur einmal.
Abi-ähnlich	Je Fach eine Sammlung mit Aufgaben, wie sie im Abitur vorkommen könnten.
Lösungsskripte	Zu den Aufgabenskripten und zu den Abi-ähnlichen Aufgaben, jeweils je Fach.
Kompakt	Formeln und Abbildungen zum schnellen Wiederholen: PL-K für Physik, ML-K für Mathe, dazu die Formelsammlung.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis 4
Was ist abiturrelevant? 5
1 Was ist eine Welle? 7
1.1 Kopplung und Ausbreitung Abi 7
1.2 Transversal- und Longitudinalwellen Abi 7
1.3 Energietransport ohne Materietransport Abi 7
2 Harmonische Wellen 9
2.1 Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit Abi 9
2.2 Die Wellenfunktion Abi 9
2.3 Momentanbild und Zeitbild Abi 10
2.4 Phase und Zeiger Abi 11
2.5 Wovon die Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängt Zusatz · nicht Abi 11
3 Überlagerung und Reflexion 12
3.1 Wellen durchdringen sich ungestört Abi 12
3.2 Reflexion am festen und am losen Ende Abi 12
4 Stehende Wellen 13
4.1 Entstehung Abi 13
4.2 Eigenschwingungen Abi 13
4.3 Saiten und Pfeifen Abi 14
4.4 Mit stehenden Wellen messen Abi 14
5 Wellen in der Ebene 15
5.1 Wellenfront und Wellennormale Abi 15
5.2 Das Huygenssche Prinzip Abi 15
5.3 Reflexion und Brechung Abi 15
5.4 Beugung Abi 16
5.5 Interferenz zweier Erreger Abi 17
5.6 Wie viele Maxima gibt es? Abi 17
5.7 Die Amplitude an einem beliebigen Punkt Abi 18
6 Polarisation 19
6.1 Nur Transversalwellen lassen sich polarisieren Abi 19
7 Der Doppler-Effekt 20
7.1 Bewegte Quelle, bewegter Beobachter Zusatz · nicht Abi 20
8 Ausblick: Elektromagnetische Wellen 21
8.1 Wellen ohne Wellenträger Abi 21
9 Das Wichtigste auf einen Blick 22

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit	Typischer Bereich / Hinweis
$y(x,\,t)$	Auslenkung des Teilchens am Ort x zur Zeit t	m	Abitur oft: $s(x,\,t)$
$\hat{y}$	Amplitude	m	Formelsammlung: $y_{\max}$; Abitur oft: $\hat{s}$
λ	Wellenlänge	m	Schall 1,7 cm bis 17 m
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit)	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	Schall in Luft 343 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (20 °C)
v	Schnelle (Geschwindigkeit eines Teilchens) bzw. Geschwindigkeit einer Schallquelle	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	–
f, T	Frequenz und Periodendauer der Schwingung jedes Teilchens	Hz, s	–
ω	Kreisfrequenz	$\frac{1}{\mathrm{s}}$	$\omega = 2\pi f$
x	Ort längs des Wellenträgers, gemessen vom Erreger	m	–
$\Delta\varphi$	Phasendifferenz	rad	$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda}$
L	Länge des Wellenträgers (Saite, Pfeife)	m	Formelsammlung: ℓ
k	Ordnung bzw. Nummer der Eigenschwingung (ganzzahlig)	–	$k = 1$: Grundschwingung
f_k	k-te Eigenfrequenz	Hz	–
d	Abstand zweier Erreger	m	–
Δs	Gangunterschied	m	–
α_1, α_2	Einfalls- und Brechungswinkel (zum Lot)	°	–

Was ist abiturrelevant?

Dieses Skript geht an einigen Stellen über den Prüfungsstoff hinaus. Maßgeblich für das Abitur 2027 in Baden-Württemberg ist der **Bildungsplan 2016, Leistungsfach**, Abschnitt 3.6.4 (Wellen). Er baut auf den Schwingungen (3.6.3, Skript PL1) auf. Jede Abschnittsüberschrift trägt eine Marke – auch im Inhaltsverzeichnis, das so zugleich als Stoffübersicht dient:

Abi	**Prüfungsstoff.** Verstehen, erklären und rechnen können.
Abi teilweise	**Teilweise Prüfungsstoff.** Was genau dazugehört, steht in einem Hinweis direkt unter der Überschrift.
IQB-Pool	**Nicht im Bildungsplan, aber in den bundesweiten Bildungsstandards.** Kann über eine Aufgabe aus dem gemeinsamen Aufgabenpool der Länder im Abitur vorkommen (seit 2026 übernimmt Baden-Württemberg solche Aufgaben). Qualitativ erklären und mit den Formeln der Formelsammlung rechnen können.
Zusatz · nicht Abi	**Geht über Bildungsplan und Bildungsstandards hinaus.** Hilft beim Verstehen, wird im Abitur aber nicht vorausgesetzt.

Die graue Marke steht außerdem an Aufgaben im Aufgabenskript, die über den Prüfungsstoff hinausgehen. **Aufgaben ohne Marke gehören zum Prüfungsstoff.**

Die Skriptreihe zum Abitur 2027

Fünf Skripte decken zusammen den gesamten schriftlich prüfbaren Stoff des Leistungsfachs ab. Dieses Skript ist farbig hinterlegt. Für die letzten Wochen vor der Prüfung fasst das Lernskript PL-Σ **Abiturvorbereitung** alles in Kurzform zusammen (rechte Spalte: Kapitel dort); seine Formelübersicht gibt es auch als eigene Formelsammlung. Ganz zum Schluss: das Kompaktskript PL-K mit allen Formeln, Abbildungen und Merkpunkten der fünf Skripte auf wenigen Seiten, ohne Erklärungen.

Nr.	Skript	Bildungsplan 3.6 …	zusätzlich IQB-Pool	im Lernskript PL-Σ
PL1	Schwingungen	3.6.3 (1)–(5), (9); Gravitationsfeld als Grundlage für den Feldvergleich in 3.6.2	Resonanz bei erzwungenen Schwingungen	3; 5.5
PL2	Wellen	3.6.4 (1)–(7)	–	4
PL3	Elektrizitätslehre	3.6.2 (elektrisches und magnetisches Feld, Elektrodynamik), 3.6.3 (6)–(8) (Schwingkreis), 3.6.4 (8), (9) (Hertzscher Dipol, Spektrum)	Coulomb'sches Gesetz, Feld einer Punktladung	5–9
PL4	Wellenoptik	3.6.5; das Licht betreffende Teile von 3.6.4 (Huygens, Brechung, Polarisation)	Interferometer, Gesetz von Malus	10
PL5	Quantenphysik	3.6.6	Koinzidenzmethode, Weltbild, Spektren und Energieniveaus, Atommodell, Potentialtopf, Laser	11

Die Denk- und Arbeitsweisen (3.6.1) ziehen sich durch alle Skripte: Modelle von Licht und Materie in 4 und 5, Naturkonstanten wie G, ε_0, μ_0, e und h in 1, 3 und 5. Das vertiefende Themengebiet (3.6.7) wird 2027 nicht schriftlich geprüft.

Was im Abitur gegeben ist

Im Abitur 2027 sind die **mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung des IQB** und der wissenschaftliche Taschenrechner erlaubt (Facherlass 2027, 26.1.3). Zu den Wellen stehen darin: $c = \lambda f$, die Wellenfunktion $y(x,\,t) = y_{\max}\sin\!\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$, die Wellenfunktion einer stehenden Welle, die Bedingungen für stehende Wellen bei zwei festen, zwei losen bzw. einem festen und einem losen Ende und – bei der Optik – das Brechungsgesetz $\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2}$. Die Formelsammlung schreibt wie dieses Skript y, dazu ℓ für die Länge des Wellenträgers; ihre Ordnungszahl k beginnt bei der Grundschwingung mit $k = 0$, in diesem Skript mit $k = 1$.

Nicht darin stehen: die Bedingungen für Verstärkung und Auslöschung bei zwei Erregern ($\Delta s = k\lambda$ bzw. $\left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$), die Phasendifferenz $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda}$, die Regeln für die Reflexion (Phasensprung am festen Ende), das Huygenssche Prinzip und alles zur Polarisation mechanischer Wellen.

Wie man den Bildungsplan liest

Begriffe in Klammern ohne Zusatz sind verbindlich, nach **„zum Beispiel“** nur Beispiele. Die Alltagsbeispiele Meereswellen und Gegenschall in 3.6.4 (3) sind also nicht verbindlich, aber typische Prüfungskontexte. Der **Doppler-Effekt** steht weder im Bildungsplan noch in den Bildungsstandards; er ist deshalb als Zusatz markiert (seine Formel steht trotzdem in der Formelsammlung, weil andere Länder ihn behandeln). Die elektromagnetischen Wellen, 3.6.4 (8) und (9), folgen in Skript PL3, weil man für den Hertzschen Dipol den Schwingkreis braucht.

Die verbindlichen Kompetenzen und wo sie stehen:

Bildungsplan	Die Schülerinnen und Schüler können …	Abschnitt
3.6.4 (1)	Wellen mit charakteristischen Größen beschreiben (λ, $c = \lambda f$, Wellenfront, Wellennormale, Polarisation)	2.1, 5.1, 6.1
3.6.4 (2)	den Unterschied zwischen Longitudinal- und Transversalwellen erläutern	1.2
3.6.4 (3)	Wellenphänomene beschreiben (Beugung, Reflexion, Brechung, Interferenz, Energietransport) und im Alltag erkennen	1.3, Kap. 3, 5.3–5.5
3.6.4 (4)	eine fortschreitende Transversalwelle beschreiben, $y(x,\,t)$ bei festem Ort und bei fester Zeit (Momentanbild)	2.2, 2.3
3.6.4 (5)	stehende Wellen beschreiben und als Interferenz erklären (Bäuche, Knoten, Eigenfrequenzen, Reflexion an festen und losen Enden)	3.2, Kap. 4
3.6.4 (6)	die Überlagerung zweidimensionaler kohärenter Wellen mit dem Gangunterschied beschreiben	5.5–5.7
3.6.4 (7)	Wellenphänomene mit dem Huygensschen Prinzip erklären	5.2–5.4
3.6.4 (8), (9)	elektromagnetisches Spektrum; Hertzscher Dipol	Skript PL3; Ausblick in 8.1

1 Was ist eine Welle?

1.1 Kopplung und Ausbreitung Abi

Stößt man das Ende eines gespannten Seils kurz nach oben, läuft ein Wellenberg das Seil entlang. Dabei bewegt sich kein Stück Seil nach vorne: Jedes Stückchen wird von seinem Nachbarn mitgezogen, schwingt kurz nach oben und wieder zurück und zieht seinerseits den nächsten Nachbarn mit. Was sich ausbreitet, ist die **Störung**, nicht das Material.

Definition

Eine **mechanische Welle** entsteht, wenn viele schwingungsfähige Teilchen miteinander **gekoppelt** sind und eines davon (der **Erreger**) angestoßen wird. Die Störung wird von Teilchen zu Teilchen weitergegeben; jedes Teilchen führt dieselbe Bewegung aus wie der Erreger, nur **später**. Der Stoff, in dem sich die Welle ausbreitet, heißt **Wellenträger**. Schwingt der Erreger harmonisch, breitet sich eine **harmonische Welle** aus: Jedes Teilchen schwingt harmonisch mit der Frequenz des Erregers.

Zwei Geschwindigkeiten darf man dabei nicht verwechseln: Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** c gibt an, wie schnell die Störung vorankommt. Die **Schnelle** v ist die Geschwindigkeit, mit der ein einzelnes Teilchen um seine Ruhelage schwingt; sie ändert sich ständig und hat den Maximalwert $\hat{v} = \hat{y}\omega$ (Skript PL1).

Ausprobieren: **Schwebung und gekoppelte Pendel** ↗ · **Transversal- und Longitudinalwelle** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗ · **Gekoppelte Oszillatoren & Normalmoden** ↗

1.2 Transversal- und Longitudinalwellen Abi

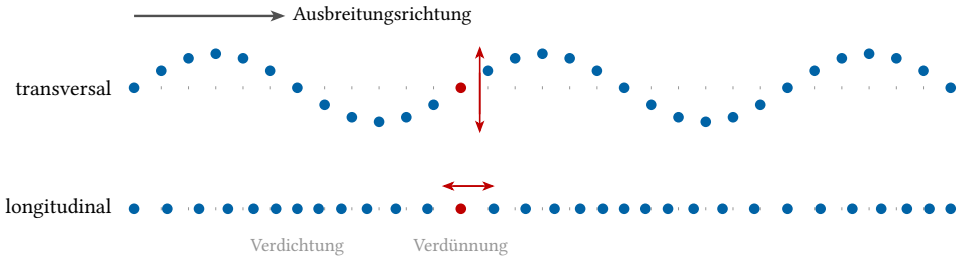


Abbildung 11: Teilchenkette als Wellenträger. Oben eine Transversalwelle: Die Teilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Unten eine Longitudinalwelle derselben Wellenlänge: Die Teilchen schwingen in Ausbreitungsrichtung; es wechseln sich Verdichtungen und Verdünnungen ab. Rot jeweils ein Teilchen mit seiner Schwingungsrichtung.

Merksatz

- **Transversalwelle (Querwelle):** Die Teilchen schwingen **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung. Beispiele: Seilwelle, Welle auf einer Gitarrensaite, S-Welle bei Erdbeben, elektromagnetische Wellen.
- **Longitudinalwelle (Längswelle):** Die Teilchen schwingen **in** Ausbreitungsrichtung. Beispiele: Schall in Luft, Welle auf einer lockeren Schraubenfeder, P-Welle bei Erdbeben.

Transversalwellen brauchen einen Wellenträger, der Querkräfte übertragen kann. In Gasen und Flüssigkeiten fehlen solche Scherkräfte; dort gibt es nur Longitudinalwellen. Bei Erdbeben verraten das die S-Wellen: Sie kommen durch den flüssigen äußeren Erdkern nicht hindurch. Wasserwellen an der Oberfläche sind ein Sonderfall: Die Wasserteilchen laufen auf Kreisbahnen, die Welle ist weder rein transversal noch rein longitudinal. Ob eine Welle transversal ist, lässt sich mit der **Polarisation** prüfen (Kap. 6).

Ausprobieren: **Transversal- und Longitudinalwelle** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

1.3 Energietransport ohne Materietransport Abi

Eine Welle transportiert Energie: Die Teilchen am Ende des Seils werden in Bewegung gesetzt, obwohl kein Teilchen vom Anfang dorthin gelangt ist. Eine Meereswelle trägt die Energie des Windes über tausende Kilometer zur Küste, das Wasser selbst bleibt fast an Ort und Stelle. Die Energie, die eine Welle mitführt, wächst wie bei jeder Schwingung mit dem **Quadrat der Amplitude**.

Typischer Fehler

Falsch: „Die Teilchen des Wellenträgers wandern mit der Welle mit, und zwar mit der Geschwindigkeit c."

Richtig: Jedes Teilchen schwingt nur um seine Ruhelage. Mit c wandert der **Schwingungszustand**; transportiert wird Energie, keine Materie.

Die Geschwindigkeit eines Teilchens (höchstens $\hat{v} = \omega\hat{y}$) hat mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c nichts zu tun.

Ausprobieren: **Transversal- und Longitudinalwelle** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗



2 Harmonische Wellen

2.1 Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit Abi

Schwingt der Erreger harmonisch mit der Periodendauer T, ist die Welle nach einer Periode um eine bestimmte Strecke vorangekommen. Diese Strecke ist zugleich der Abstand zweier benachbarter Teilchen, die gleichphasig schwingen, etwa zweier benachbarter Wellenberge.

Definition

Die **Wellenlänge** λ ist der Abstand zweier benachbarter Teilchen, die im gleichen Schwingungszustand sind (gleichphasig schwingen). In der Zeit T legt die Welle genau eine Wellenlänge zurück:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Die Frequenz einer Welle wird vom Erreger festgelegt, die Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Wellenträger. Beim Übergang in einen anderen Wellenträger bleibt f gleich, c und damit λ ändern sich.

Beispiel 1

Der Kammerton a' ($f = 440$ Hz) hat in Luft ($c = 343\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$) die Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{f} = 0{,}780$ m, im Wasser ($c = 1480\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$) die Wellenlänge 3,36 m.

Typischer Fehler

Falsch: Beim Übergang in ein anderes Medium ändert sich die Frequenz.

Richtig: Die Frequenz gibt der Erreger vor; sie bleibt gleich. Es ändern sich c und damit $\lambda = \frac{c}{f}$.

Deshalb klingt ein Ton unter Wasser gleich hoch, obwohl seine Wellenlänge dort gut viermal so groß ist.

Ausprobieren: **Wellengleichung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

2.2 Die Wellenfunktion Abi

Abi: Jedes Teilchen schwingt wie in Skript PL1, aber x ist hier der Ort längs des Wellenträgers. Deshalb heißt die Auslenkung y und die Amplitude $\hat{y}$, wie in der IQB-Formelsammlung ($y_{\max}$). Viele Abituraufgaben schreiben stattdessen s und $\hat{s}$.

Der Erreger am Ort $x = 0$ beginnt zur Zeit $t = 0$ harmonisch zu schwingen: $y(0,\, t) = \hat{y}\sin(\omega t)$. Ein Teilchen am Ort x macht dieselbe Bewegung, aber um die Laufzeit $\frac{x}{c}$ später. Man ersetzt also t durch $t - \frac{x}{c}$:

$$y(x,\, t) = \hat{y}\sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) = \hat{y}\sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{cT}\right)\right).$$

Merksatz

Wellenfunktion einer nach rechts laufenden harmonischen Welle:

$$y(x,\, t) = \hat{y}\cdot\sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right) \quad \text{für} \quad x \le c\cdot t,$$

für $x > ct$ ist $y = 0$ – dort ist die Welle noch nicht angekommen. Die Funktion hängt von **zwei** Variablen ab: Hält man den Ort fest, beschreibt sie die Schwingung **eines** Teilchens; hält man die Zeit fest, beschreibt sie die Form des ganzen Wellenträgers in diesem Moment.

Eine nach **links** laufende Welle hat ein Pluszeichen: $y(x,\, t) = \hat{y}\sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)\right)$. Beginnt der Erreger nicht in der Ruhelage, kommt ein Nullphasenwinkel hinzu, etwa $\hat{y}\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$ für einen Erreger, der zur Zeit 0 maximal ausgelenkt ist.

Beispiel 2

Eine Seilwelle hat $\hat{y} = 2{,}0$ cm, $T = 0{,}50$ s und $\lambda = 0{,}40$ m, also $c = 0{,}80\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Das Teilchen bei $x = 0{,}30$ m wird nach $\frac{0{,}30\ \text{m}}{0{,}80\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0{,}375$ s erreicht. Zur Zeit $t = 1{,}0$ s ist es bei

$$y(0{,}30\ \text{m},\, 1{,}0\ \text{s}) = 2{,}0\ \text{cm}\cdot\sin\left(2\pi\left(\frac{1{,}0}{0{,}50} - \frac{0{,}30}{0{,}40}\right)\right) = 2{,}0\ \text{cm}\cdot\sin(2\pi\cdot 1{,}25) = 2{,}0\ \text{cm}\ .$$

Es ist gerade maximal nach oben ausgelenkt.

Typischer Fehler

Falsch: $y(x,\,t) = \hat{y}\sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$ für alle Orte und Zeiten verwenden.

Richtig: Die Gleichung gilt nur dort, wo die Welle schon angekommen ist, also für $x \leq ct$. Davor ist $y = 0$.

Wer das vergisst, erhält für Orte, die die Welle noch gar nicht erreicht hat, eine Auslenkung.

Ausprobieren: **Wellengleichung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

2.3 Momentanbild und Zeitbild Abi

Wellen werden mit zwei Arten von Diagrammen dargestellt, die man leicht verwechselt:

Merksatz

- **Momentanbild** (x-y-Diagramm, Zeit fest): eine „Fotografie“ des Wellenträgers. Man liest die **Wellenlänge** ab und sieht, wie weit die Welle schon gelaufen ist.
- **Zeitbild** oder **Schwingungsdiagramm** (t-y-Diagramm, Ort fest): die Schwingung **eines** Teilchens. Man liest die **Periodendauer** ab und, wann die Welle das Teilchen erreicht.

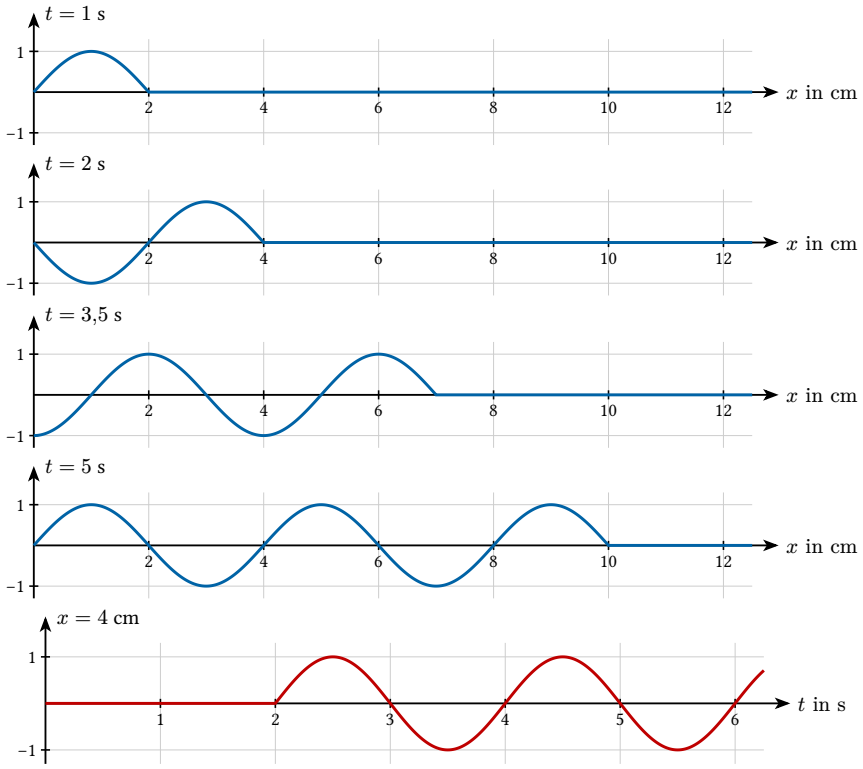


Abbildung 12: Oben vier Momentanbilder einer Welle mit $\hat{y} = 1$ cm, $\lambda = 4$ cm und $T = 2$ s ($c = 2\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$), die zur Zeit 0 bei $x = 0$ mit einer Bewegung nach oben startet. Die Wellenfront läuft in jeder Sekunde 2 cm weiter; nach jeder vollen Periode ist ein Wellenberg und ein Wellental mehr entstanden. Unten das Zeitbild des Teilchens bei $x = 4$ cm: Es ruht, bis die Welle nach 2 s ankommt, und schwingt dann wie der Erreger.

Ein häufiger Fehler beim Zeichnen von Momentanbildern betrifft die Front: Das Teilchen **direkt an der Wellenfront** beginnt gerade erst zu schwingen, und zwar so, wie der Erreger zur Zeit 0 gestartet ist. Startet der Erreger nach oben, liegt unmittelbar hinter der Front deshalb immer ein Wellenberg: Das Teilchen eine Viertelwellenlänge hinter der Front schwingt schon eine Viertelperiode lang und ist gerade ganz oben. Der erste Berg, den der Erreger erzeugt hat, läuft der Welle voraus.

Typischer Fehler

Falsch: Momentanbild und Zeitbild verwechseln, etwa den Abstand zweier Berge im t-y-Diagramm als Wellenlänge ablesen.

Richtig: Im Momentanbild (x-Achse) ist der Abstand zweier Wellenberge die Wellenlänge λ, im Zeitbild (t-Achse) die Periodendauer T.

Vor dem Ablesen zuerst die Achsenbeschriftung ansehen.

Ausprobieren: **Wellengleichung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

2.4 Phase und Zeiger Abi

Wie in Skript PL1 kann man jedem Teilchen einen rotierenden Zeiger zuordnen. Alle Zeiger drehen sich gleich schnell, aber jeder hinkt seinem linken Nachbarn etwas hinterher:

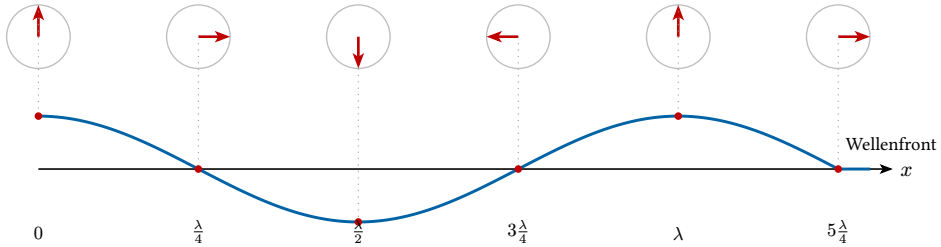


Abbildung 13: Momentanbild mit Zeigern an einigen Orten. Die senkrechte Komponente jedes Zeigers ist die Auslenkung an diesem Ort. Pro Viertelwellenlänge bleibt der Zeiger um 90° zurück; im Abstand λ zeigen die Zeiger wieder in dieselbe Richtung.

Merksatz

Zwei Teilchen im Abstand Δx längs der Ausbreitungsrichtung schwingen mit der **Phasendifferenz**

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta x}{\lambda}.$$

Ist Δx ein ganzzahliges Vielfaches von λ, schwingen sie **gleichphasig**; ist Δx ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, schwingen sie **gegenphasig**.

Ausprobieren: **Wellengleichung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

2.5 Wovon die Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängt Zusatz · nicht Abi

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt nur vom Wellenträger ab, nicht von Frequenz oder Amplitude (solange die Welle schwach ist). Für ein Seil oder eine Saite mit der Spannkraft F und der Masse μ pro Länge gilt $c = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$: Eine straffere Saite leitet die Welle schneller, eine schwerere langsamer. Schall läuft in Luft mit 343 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ (bei 20°C, wärmer etwas schneller), in Wasser mit rund 1480 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und in Stahl mit rund 5000 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Bei Wasserwellen hängt c von der Wassertiefe ab: In flachem Wasser sind sie langsamer – die Grundlage der Brechung in Abschnitt 5.3.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 22** (Welche Welle ist das?, im Aufgabenskript), **Aufgabe 23** (Wellenlängen berechnen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 24** (Zwei Wellenfunktionen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 25** (Wellenfunktion aufstellen und zeichnen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 26** (Welle mit Kosinus-Start, im Aufgabenskript), **Aufgabe 146** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 147** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 148** (in der Sammlung Abi-ähnlich).



3 Überlagerung und Reflexion

3.1 Wellen durchdringen sich ungestört Abi

Laufen zwei Wellenberge auf einem Seil aufeinander zu, addieren sich dort, wo sie sich treffen, die Auslenkungen. Danach laufen beide unverändert weiter, als wäre nichts gewesen. Das ist das **Superpositionsprinzip**.

Merksatz

Superposition: Treffen an einem Ort mehrere Wellen zusammen, addieren sich ihre Auslenkungen:

$$y(x,\,t) = y_1(x,\,t) + y_2(x,\,t).$$

Die Wellen beeinflussen einander nicht und laufen nach der Begegnung ungestört weiter. Die Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz heißt **Interferenz**: Treffen Berg und Berg zusammen, verstärken sie sich (**konstruktive** Interferenz); treffen Berg und Tal gleicher Höhe zusammen, löschen sie sich aus (**destruktive** Interferenz).

Ausprobieren: **Seilwelle: Reflexion am Ende** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

3.2 Reflexion am festen und am losen Ende Abi

Am Ende eines Wellenträgers wird eine Welle reflektiert und läuft zurück. Was zurückkommt, hängt davon ab, ob das Ende fest eingespannt oder frei beweglich ist:

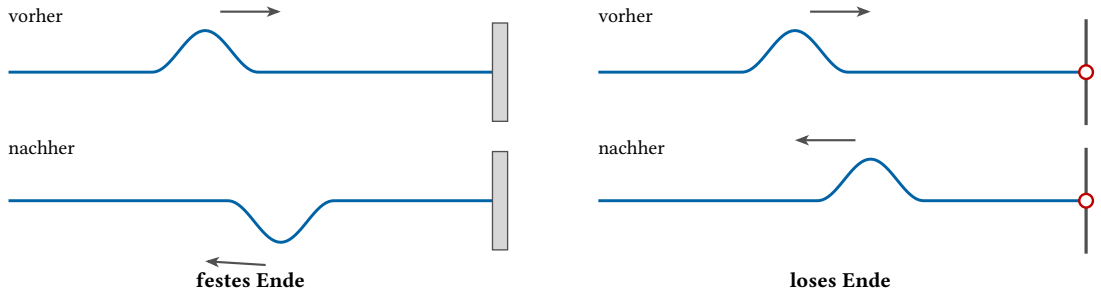


Abbildung 14: Reflexion eines Wellenbergs. Links am festen Ende (Wand): Es kommt ein Wellental zurück. Rechts am losen Ende (Ring auf einer Stange): Es kommt ein Wellenberg zurück.

Merksatz

- **Festes Ende:** Das letzte Teilchen kann sich nicht bewegen. Der ankommende Berg zieht an der Befestigung; die Gegenkraft der Wand erzeugt einen nach unten gerichteten Puls. Die Welle wird mit **Phasensprung um π** (eine halbe Wellenlänge) reflektiert: Aus einem Berg wird ein Tal. Am festen Ende selbst ist die Auslenkung immer null.
- **Loses Ende:** Das letzte Teilchen schwingt frei und schießt sogar über die Amplitude hinaus. Die Welle wird **ohne Phasensprung** reflektiert: Ein Berg kommt als Berg zurück.

Man kann sich das so merken: Am festen Ende überlagern sich ankommende und reflektierte Welle so, dass sie sich dort immer auslöschen – das geht nur, wenn die reflektierte Welle gegenphasig ist. Dasselbe Verhalten zeigen Schallwellen am Ende eines Rohrs: Ein geschlossenes Ende wirkt für die Luftteilchen wie ein festes Ende, ein offenes wie ein loses.

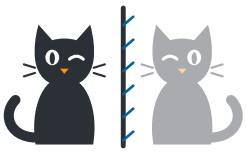
Typischer Fehler

Falsch: Am festen Ende wird ein Wellenberg als Berg reflektiert.

Richtig: Am festen Ende kehrt sich die Auslenkung um: Aus dem Berg wird ein Tal (Phasensprung um π). Am losen Ende wird ein Berg als Berg reflektiert.

In einer stehenden Welle liegt deshalb am festen Ende immer ein Knoten, am losen Ende ein Bauch.

Ausprobieren: **Stehende Welle auf dem Seil** ↗ · **Seilwelle: Reflexion am Ende** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Stehende Wellen & Eigenmoden** ↗ · **Wellenausbreitung & Superposition** ↗



4 Stehende Wellen

4.1 Entstehung Abi

Schwingt der Erreger dauernd, überlagern sich die einlaufende und die am Ende reflektierte Welle. Beide haben dieselbe Frequenz und Amplitude, laufen aber in entgegengesetzte Richtungen. Das Ergebnis ist eine merkwürdige Bewegung: Die Welle scheint nicht mehr zu laufen. Es gibt Stellen, die sich nie bewegen, und dazwischen Stellen, die besonders stark schwingen – eine **stehende Welle**.

Rechnerisch sieht man das mit dem Additionstheorem aus Skript PL1. Für zwei gegenläufige Wellen gilt

$$y(x,\,t) = \hat{y}\sin\left(\omega t - 2\pi\frac{x}{\lambda}\right) + \hat{y}\sin\left(\omega t + 2\pi\frac{x}{\lambda}\right) = \underbrace{2\hat{y}\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right)}_{\text{Amplitude am Ort } x} \cdot \sin(\omega t).$$

Alle Teilchen schwingen mit derselben Frequenz, aber mit einer **ortsabhängigen Amplitude**. Wo $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0$ ist, bleibt das Teilchen immer in Ruhe.

Merksatz

Eine **stehende Welle** entsteht durch Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen gleicher Frequenz und Amplitude.

- **Knoten** (K): Stellen, die immer in Ruhe sind (destruktive Interferenz).
- **Bäuche** (B): Stellen, die mit der größten Amplitude $2\hat{y}$ schwingen (konstruktive Interferenz).
- Benachbarte Knoten haben den Abstand $\frac{\lambda}{2}$, ebenso benachbarte Bäuche; zwischen Knoten und Bauch liegt $\frac{\lambda}{4}$.
- Alle Teilchen zwischen zwei benachbarten Knoten schwingen **gleichphasig**; jenseits eines Knotens gegenphasig.
- Am festen Ende liegt ein Knoten, am losen Ende ein Bauch.

Der Unterschied zur fortschreitenden Welle lässt sich an zwei Merkmalen festmachen: Bei der fortschreitenden Welle schwingen alle Teilchen mit derselben Amplitude, aber mit unterschiedlicher Phase. Bei der stehenden Welle schwingen alle Teilchen (zwischen zwei Knoten) in derselben Phase, aber mit unterschiedlicher Amplitude. Und: Eine stehende Welle transportiert keine Energie; die Energie pendelt zwischen den Knoten hin und her.

Ausprobieren: **Stehende Welle auf dem Seil ↗** · **Wellengleichung ↗** · **Seilwelle: Reflexion am Ende ↗** Üben: **noctua ↗**
Einordnen: **Stehende Wellen & Eigenmoden ↗** · **Wellenausbreitung & Superposition ↗**

4.2 Eigenschwingungen Abi

Ist der Wellenträger an **beiden** Enden begrenzt, läuft die Welle hin und her. Eine stabile stehende Welle mit großer Amplitude bildet sich nur bei bestimmten Frequenzen: dann, wenn die Bedingungen an beiden Enden (Knoten oder Bauch) gleichzeitig erfüllt sind. Diese Frequenzen heißen **Eigenfrequenzen**, die zugehörigen Schwingungsformen **Eigenschwingungen**. Die tiefste heißt **Grundschwingung**, die übrigen **Oberschwingungen**.

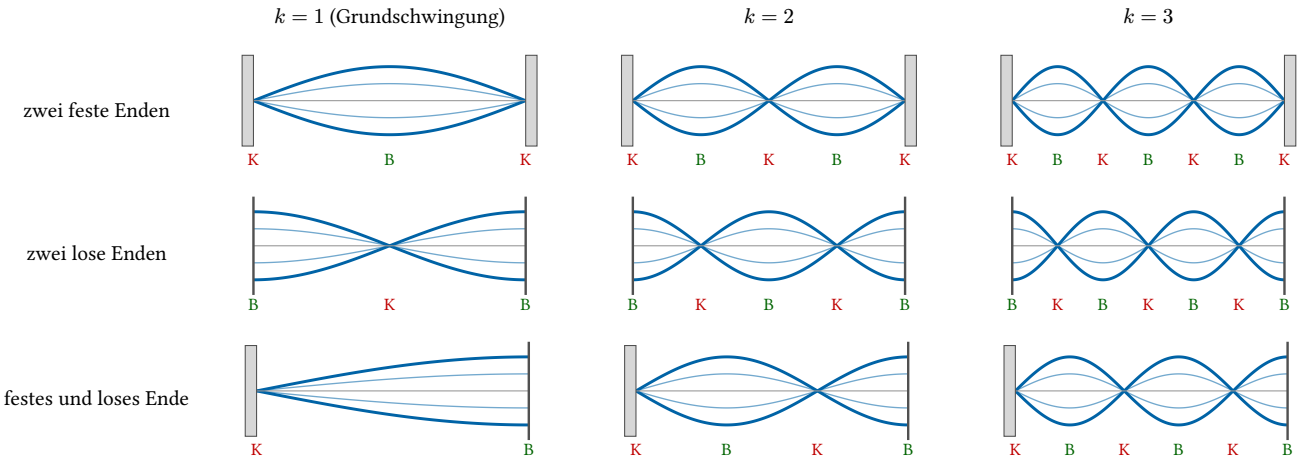


Abbildung 15: Die ersten drei Eigenschwingungen eines Wellenträgers der Länge L. Gezeichnet ist die Einhüllende (größte Auslenkung) mit zwei Zwischenlagen; K Knoten, B Bauch. Bei zwei gleichen Enden passt ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$ auf die Länge, bei verschiedenen Enden ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{4}$.

Merksatz

Zwei feste oder zwei lose Enden: $L = k \cdot \frac{\lambda_k}{2} \quad \Rightarrow \quad f_k = k \cdot \frac{c}{2L}, \quad k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$
Alle ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz kommen vor.

Ein festes und ein loses Ende: $L = (2k-1) \cdot \frac{\lambda_k}{4} \quad \Rightarrow \quad f_k = (2k-1) \cdot \frac{c}{4L}, \quad k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$
Nur die ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz kommen vor; die Grundfrequenz ist halb so groß wie bei zwei gleichen Enden derselben Länge.

Regt man einen Wellenträger mit einer Frequenz an, die **keine** Eigenfrequenz ist, laufen die reflektierten Wellen nicht im Takt zurück, und es entsteht keine stehende Welle mit großer Amplitude. Bei einer Eigenfrequenz dagegen verstärkt jede Reflexion die Schwingung – es ist dieselbe **Resonanz** wie beim Federpendel in Skript PL1, nur dass ein Wellenträger nicht eine, sondern unendlich viele Eigenfrequenzen hat.

Typischer Fehler

Falsch: Benachbarte Knoten einer stehenden Welle haben den Abstand λ.
Richtig: Benachbarte Knoten (und benachbarte Bäuche) liegen $\frac{\lambda}{2}$ auseinander, ein Knoten und der nächste Bauch $\frac{\lambda}{4}$.

Daraus folgen die Eigenschwingungen: beidseitig eingespannt $L = k \cdot \frac{\lambda_k}{2}$, einseitig geschlossen $L = (2k-1) \cdot \frac{\lambda_k}{4}$. Im zweiten Fall gibt es nur ungeradzahlige Vielfache der Grundfrequenz.

Ausprobieren: **Stehende Welle auf dem Seil ↗** · **Kundtsches Rohr ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Stehende Wellen & Eigenmoden ↗**

4.3 Saiten und Pfeifen Abi

Musikinstrumente nutzen Eigenschwingungen. Eine **Gitarrensaite** ist an beiden Enden fest eingespannt. Zupft man sie, schwingt sie mit der Grundfrequenz und gleichzeitig mit vielen Oberschwingungen; deren Mischung bestimmt die Klangfarbe. Greift man die Saite ab, wird L kürzer und der Ton höher; spannt man sie stärker, steigt c und damit ebenfalls f.

In einer **Pfeife** schwingt die Luftsäule (Longitudinalwelle). Ein offenes Rohrende wirkt als loses Ende (Bauch der Teilchenbewegung), ein geschlossenes als festes Ende (Knoten). Eine an beiden Enden offene Pfeife hat also die Eigenfrequenzen $\frac{k \cdot c}{2L}$, eine **gedackte** Pfeife (ein Ende geschlossen) nur $\frac{(2k-1) \cdot c}{4L}$ – sie klingt bei gleicher Länge eine Oktave tiefer und hohler, weil die geradzahligen Obertöne fehlen.

Beispiel 3

Die A-Saite einer Gitarre ist $L = 0{,}65$ m lang und hat die Grundfrequenz 110 Hz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Saite ist $c = 2Lf_1 = 143\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die ersten Obertöne liegen bei 220 Hz, 330 Hz und 440 Hz. Eine 1,0 m lange, beidseitig offene Orgelpfeife hat in Luft ($c = 343\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$) die Grundfrequenz $f_1 = \frac{c}{2L} = 172$ Hz; gedackt nur 86 Hz.

Ausprobieren: **Fourier-Synthese ↗** · **Kundtsches Rohr ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Stehende Wellen & Eigenmoden ↗** · **Musikalische Akustik & Instrumente ↗**

4.4 Mit stehenden Wellen messen Abi

Weil der Knotenabstand genau $\frac{\lambda}{2}$ ist, kann man an einer stehenden Welle die Wellenlänge direkt messen und mit der bekannten Frequenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen. So misst man die Schallgeschwindigkeit in einem Rohr mit Lautsprecher und verschiebbarem Kolben oder die Lichtgeschwindigkeit mit stehenden Mikrowellen vor einer Metallplatte (Skript PL4, Abschnitt Lichtgeschwindigkeit). Im Mikrowellenherd entstehen ebenfalls stehende Wellen – deshalb hat er einen Drehteller, sonst bliebe das Essen an den Knoten kalt.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 149** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 152** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 27** (Wie viele Knoten?, im Aufgabenskript), **Aufgabe 154** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 153** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 155** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 156** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 28** (Draht im Hufeisenmagneten, im Aufgabenskript), **Aufgabe 157** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 29** (Offen oder gedackt?, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 30** (Schokolade im Mikrowellenherd, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Stehende Welle auf dem Seil ↗** · **Mikrowellen: Reflexion und Polarisation ↗** · **Kundtsches Rohr ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Stehende Wellen & Eigenmoden ↗** · **Elektromagnetische Wellen ↗**

5 Wellen in der Ebene

5.1 Wellenfront und Wellennormale Abi

Auf einer Wasseroberfläche oder im Raum breiten sich Wellen in mehrere Richtungen aus. Wirft man einen Stein ins Wasser, laufen Kreiswellen nach außen; eine lange, gerade Leiste, die auf und ab bewegt wird, erzeugt gerade (ebene) Wellen.

Definition

- Eine **Wellenfront** verbindet benachbarte Punkte, die im gleichen Schwingungszustand sind – zum Beispiel einen ganzen Wellenberg.
- Eine **Wellennormale** steht senkrecht auf den Wellenfronten und zeigt in Ausbreitungsrichtung. In der Optik heißt sie **Lichtstrahl**.

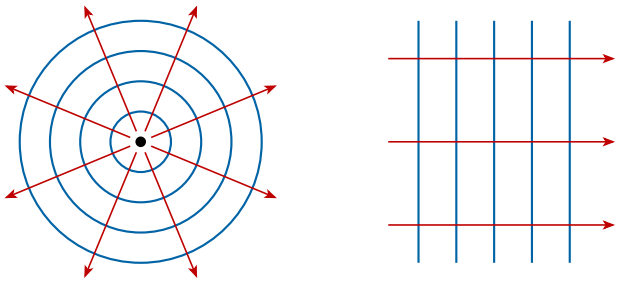


Abbildung 16: Links Kreiswellen um einen punktförmigen Erreger: Die Wellennormalen laufen radial nach außen. Rechts eine ebene Welle: Die Wellennormalen sind parallel. Der Abstand benachbarter Wellenberge ist die Wellenlänge.

Untersucht werden solche Wellen in der **Wellenwanne**: einer flachen Wanne mit Wasser, durch deren Glasboden man die Wellen von unten beleuchtet. Wellenberge wirken wie Sammellinsen und erscheinen auf einem Schirm hell, Täler dunkel.

Ausprobieren: **Huygenssches Prinzip** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

5.2 Das Huygenssche Prinzip Abi

Christiaan Huygens beschrieb 1678 eine Regel, mit der sich die Ausbreitung jeder Welle konstruieren lässt:

Definition

Huygenssches Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer kreisförmigen (räumlich: kugelförmigen) **Elementarwelle**, die sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wellenträgers ausbreitet. Die neue Wellenfront ist die gemeinsame **Einhüllende** aller Elementarwellen.

Bei einer ebenen Welle im freien Wasser ergeben die Elementarwellen wieder eine gerade Front – die Welle läuft geradeaus. Interessant wird es an Hindernissen, Öffnungen und Grenzflächen. In Skript PL4 wird das Prinzip auf Licht angewendet.

Ausprobieren: **Huygenssches Prinzip** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

5.3 Reflexion und Brechung Abi

Trifft eine ebene Welle schräg auf eine Wand, erreicht ein Ende der Front die Wand früher als das andere. Die Elementarwellen, die von den getroffenen Wandpunkten ausgehen, bilden eine zurücklaufende Front, die unter demselben Winkel abläuft: **Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel**.

Läuft eine Welle schräg in ein Gebiet, in dem sie langsamer ist – bei Wasserwellen: flacheres Wasser –, wachsen die dortigen Elementarwellen in derselben Zeit weniger weit. Die Front knickt ab, die Welle wird **gebrochen**:

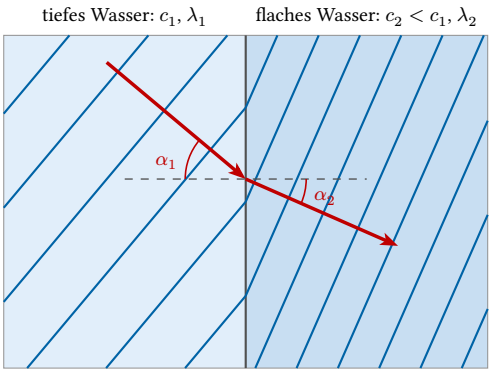


Abbildung 17: Brechung in der Wellenwanne. Über einer flachen Stelle (rechts) laufen die Wellen langsamer, die Wellenlänge wird kürzer. Weil die Fronten an der Grenze zusammenhängen müssen, knickt die Wellennormale zum Lot hin. Hier $\alpha_1 = 40°$ und $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{c_2}{c_1} = 0{,}625$, also $\alpha_2 = 24°$.

Merksatz

Brechungsgesetz: Läuft eine Welle von einem Gebiet mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 in eines mit c_2, so gilt für Einfalls- und Brechungswinkel (zum Lot)

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Die Frequenz bleibt gleich; Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge ändern sich. Ist die Welle im zweiten Gebiet langsamer, wird sie zum Lot hin gebrochen.

Das erklärt eine Alltagsbeobachtung: Am Strand laufen die Wellen fast immer parallel zur Küste ein, auch wenn der Wind schräg weht. Zum Ufer hin wird das Wasser flacher, die Wellen werden langsamer und biegen sich zum Lot, also senkrecht zur Küste.

Ausprobieren: **Huygenssches Prinzip** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

5.4 Beugung Abi

Trifft eine Welle auf eine Öffnung oder ein Hindernis, läuft sie auch in den Bereich hinter der Kante, den sie geradlinig nicht erreichen dürfte (den **Schattenraum**). Diese Erscheinung heißt **Beugung**. Nach Huygens ist sie selbstverständlich: Die Punkte in der Öffnung senden Elementarwellen in alle Richtungen aus.

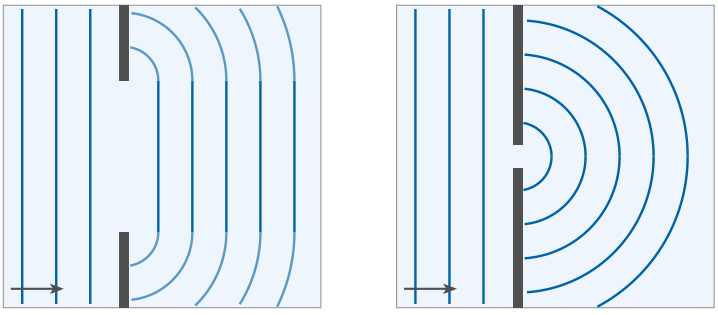


Abbildung 18: Beugung am Spalt. Bei einem breiten Spalt bleibt die Front in der Mitte gerade, nur an den Rändern biegt sie sich in den Schattenraum. Ist die Öffnung so klein wie die Wellenlänge, wirkt sie wie ein einziges Erregerzentrum: Hinter dem Spalt läuft eine Kreiswelle.

Merksatz

Beugung ist umso ausgeprägter, je kleiner die Öffnung bzw. das Hindernis im Vergleich zur Wellenlänge ist. Ist die Öffnung viel größer als λ, breitet sich die Welle fast geradlinig aus.

Darum hört man Musik um die Hausecke (Schall: λ bis mehrere Meter), sieht aber nicht um die Ecke (Licht: λ unter einem Mikrometer). Langwellige Meereswellen dringen durch eine Hafeneinfahrt weit in den Hafen ein, kurze Kräuselwellen kaum.

Ausprobieren: **Huygenssches Prinzip** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗

5.5 Interferenz zweier Erreger Abi

Zwei Stifte tauchen im gleichen Takt in die Wellenwanne. Jeder erzeugt Kreiswellen, die sich überlagern. Es entsteht ein ruhendes Muster: Auf bestimmten Linien schwingt das Wasser besonders stark, auf anderen bleibt es in Ruhe.

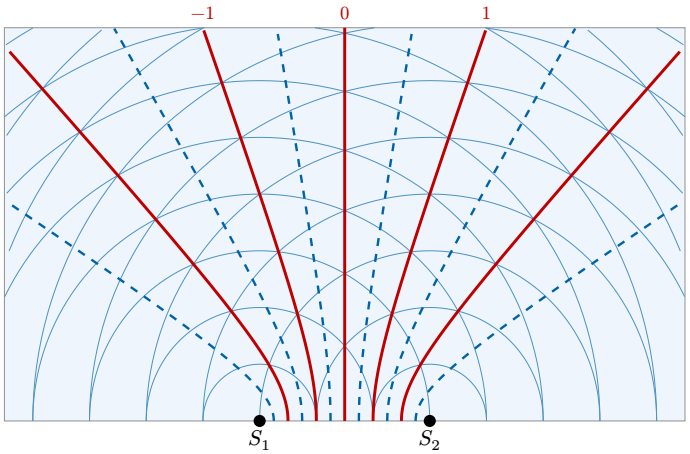


Abbildung 19: Interferenz zweier gleichphasig schwingender Erreger S_1, S_2 im Abstand $d = 3\lambda$. Blau: Wellenberge zu einem festen Zeitpunkt. Rot: Linien maximaler Verstärkung (Gangunterschied $k\lambda$, die Zahl oben ist k); gestrichelt: Linien der Auslöschung (Gangunterschied $\left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$). Wo sich zwei Berge treffen, liegt immer ein Maximum.

Entscheidend ist, wie weit ein Punkt P von den beiden Erregern entfernt ist. Die Wellen brauchen unterschiedlich lange; ist der Weg von S_2 um Δs länger, kommt diese Welle mit der Phasendifferenz $\frac{2\pi\Delta s}{\lambda}$ an.

Merksatz

Für zwei **gleichphasig** schwingende Erreger heißt $\Delta s = |\overline{S_2P} - \overline{S_1P}|$ der **Gangunterschied** im Punkt P.

- $\Delta s = k \cdot \lambda$ ($k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots$): Die Wellen kommen gleichphasig an – **Maximum** (Amplitude $2\hat{y}$).
- $\Delta s = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$: Die Wellen kommen gegenphasig an – **Minimum** (Auslöschung).

Schwingen die Erreger **gegenphasig**, vertauschen sich die Bedingungen.

Die Orte mit gleichem Gangunterschied liegen auf **Hyperbeln** mit den Erregern als Brennpunkten (rote und gestrichelte Linien in der Abbildung). Auf der Mittelsenkrechten von S_1S_2 ist $\Delta s = 0$, dort liegt bei gleichphasigen Erregern immer das Maximum nullter Ordnung. Damit ein stabiles Muster entsteht, müssen die Erreger **kohärent** sein: gleiche Frequenz und feste Phasenbeziehung (Skript PL4).

Typischer Fehler

Falsch: Bei zwei Erregern liegt das Maximum immer bei $\Delta s = k\lambda$.

Richtig: Das gilt für **gleichphasige** Erreger. Schwingen sie gegenphasig, sind die Bedingungen vertauscht: Maximum bei $\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$, Minimum bei $\Delta s = k\lambda$.

Bei gegenphasigen Erregern liegt deshalb auf der Mittelsenkrechten ($\Delta s = 0$) ein Minimum.

Ausprobieren: **Wellenwanne: Interferenz zweier Erreger ↗** · **Gegenschall ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition ↗** · **Interferenz, Beugung, Doppelspalt & Gitter ↗**

5.6 Wie viele Maxima gibt es? Abi

Der Gangunterschied kann nie größer als der Erregerabstand d werden (Dreiecksungleichung); den Wert d erreicht er auf der Verbindungsgeraden außerhalb der Strecke S_1S_2. Daraus folgt:

Merksatz

Bei zwei gleichphasigen Erregern im Abstand d gibt es für jedes k mit $k\lambda < d$ eine Maximumslinie auf jeder Seite der Mittelsenkrechten. Auf der Strecke zwischen den Erregern liegen die Maxima im Abstand $\frac{\lambda}{2}$. Auf der Verbindungsgeraden außerhalb der Erreger ist $\Delta s = d$ überall gleich: Ist d ein Vielfaches von λ, ist dort überall Verstärkung, ist d ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, überall Auslöschung.

In großem Abstand ($\overline{S_1P} \gg d$) laufen die Wellen praktisch parallel, und es gilt wie beim Doppelspalt $\Delta s = d\sin(\alpha)$, wobei α der Winkel zur Mittelsenkrechten ist. Diese **Fernfeldnäherung** ist die Grundlage der Wellenoptik (Skript PL4).

Beispiel 4

Zwei gleichphasige Erreger haben den Abstand $d = 6{,}0$ cm, die Wellenlänge ist $\lambda = 2{,}0$ cm. Maxima gibt es für $k\lambda < 6{,}0$ cm, also für $k = 0,\ 1,\ 2$: die Mittelsenkrechte und je zwei Hyperbeln auf jeder Seite, insgesamt fünf Maximumslinien. Auf der Verbindungsgeraden außerhalb ist $\Delta s = 3\lambda$: auch dort Verstärkung.

Ausprobieren: **Wellenwanne: Interferenz zweier Erreger** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗ · **Interferenz, Beugung, Doppelspalt & Gitter** ↗

5.7 Die Amplitude an einem beliebigen Punkt Abi

Liegt ein Punkt weder auf einem Maximum noch auf einem Minimum, bestimmt man die Amplitude mit Zeigern (Skript PL1): Die beiden Zeiger gleicher Länge $\hat{y}$ schließen den Winkel $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta s}{\lambda}$ ein. Ihr Summenzeiger hat die Länge

$$\hat{y}_{\text{res}} = 2\hat{y} \cdot \left|\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\right| = 2\hat{y} \cdot \left|\cos\left(\pi\frac{\Delta s}{\lambda}\right)\right| .$$

Beispiel 5

Ein Punkt ist 5,0 cm vom einen und 5,83 cm vom anderen Erreger entfernt, $\lambda = 2{,}0$ cm. Dann ist $\Delta s = 0{,}83$ cm, $\Delta\varphi = 2\pi \cdot 0{,}415 = 149°$ und $\hat{y}_{\text{res}} = 2\hat{y}\cos(74{,}7°) = 0{,}53\hat{y}$: Die Wasseroberfläche schwingt dort schwächer als bei einem Erreger allein.

Gegenschall und Lärmschutz

Interferenz wird technisch genutzt, um Lärm zu bekämpfen. Kopfhörer mit aktiver Geräuschunterdrückung erzeugen ein gegenphasiges Signal („Gegenschall“), das den Lärm am Ohr auslöscht. Das funktioniert vor allem bei tiefen Tönen gut: Dort ist die Wellenlänge groß, und eine kleine Abweichung im Ort oder in der Laufzeit stört die Gegenphase kaum.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 31** (Brechung in der Wellenwanne, im Aufgabenskript), **Aufgabe 32** (Wellen an der Hafeneinfahrt, im Aufgabenskript), **Aufgabe 158** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 159** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 160** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 33** (Maxima neben den Erregern, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 34** (Zwei Lautsprecher, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Wellenwanne: Interferenz zweier Erreger** ↗ · **Gegenschall** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wellenausbreitung & Superposition** ↗ · **Interferenz, Beugung, Doppelspalt & Gitter** ↗



6 Polarisation

6.1 Nur Transversalwellen lassen sich polarisieren Abi

Führt man ein Seil durch einen senkrechten Schlitz, etwa zwischen zwei Latten eines Zauns, kommt eine senkrecht schwingende Seilwelle ungehindert hindurch. Eine waagrecht schwingende Welle wird dagegen gestoppt. Hinter dem Schlitz schwingt das Seil nur noch in **einer** Ebene.

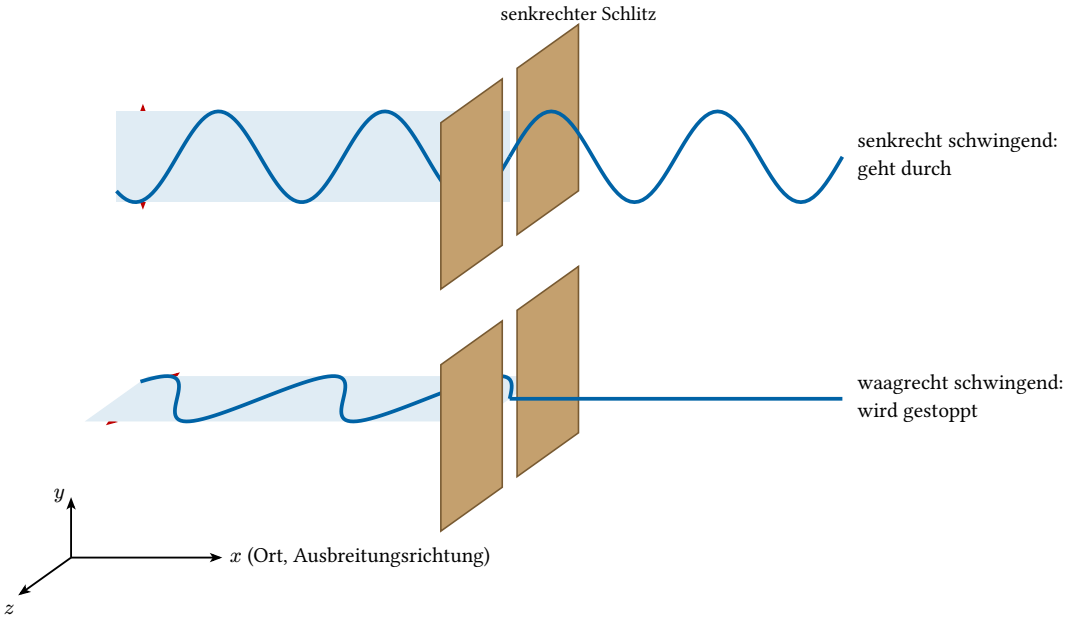


Abbildung 20: Seilwellen vor einem senkrechten Schlitz (Ort x längs der Ausbreitung). Oben schwingt das Seil senkrecht (in y-Richtung) und läuft ungehindert durch. Unten schwingt es waagrecht (in z-Richtung): Der Schlitz hält diese Bewegung auf, dahinter bleibt das Seil in Ruhe. Hell hinterlegt ist jeweils die Schwingungsebene.

Definition

Eine Transversalwelle heißt **linear polarisiert**, wenn alle Teilchen in derselben Richtung schwingen. Die Ebene aus Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung heißt **Schwingungsebene**. Ein **Polarisator** (Schlitz, Gitter, Polarisationsfilter) lässt nur die Schwingungskomponente in einer Richtung durch.

Merksatz

Nur **Transversalwellen** können polarisiert werden. Bei einer Longitudinalwelle schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung; einen Schlitz durchläuft sie unabhängig von dessen Lage. Lässt sich eine Welle polarisieren, beweist das, dass sie transversal ist.

Schall in Luft lässt sich deshalb nicht polarisieren. Licht und Mikrowellen dagegen schon – ein entscheidender Hinweis darauf, dass sie Transversalwellen sind. Wie ein Metallgitter Mikrowellen polarisiert, zeigt Skript PL3, die Polarisation des Lichts mit dem Gesetz von Malus Skript PL4.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 35** (Polarisation prüfen, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Mikrowellen: Reflexion und Polarisation** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektromagnetische Wellen** ↗ · **Hochfrequenztechnik, Leitungen & Antennen** ↗



7 Der Doppler-Effekt

7.1 Bewegte Quelle, bewegter Beobachter Zusatz · nicht Abi

Fährt ein Krankenwagen mit Martinshorn vorbei, hört man den Ton beim Herannahen höher und beim Wegfahren tiefer, obwohl die Sirene immer gleich klingt. Die Quelle läuft ihren eigenen Wellenfronten hinterher:

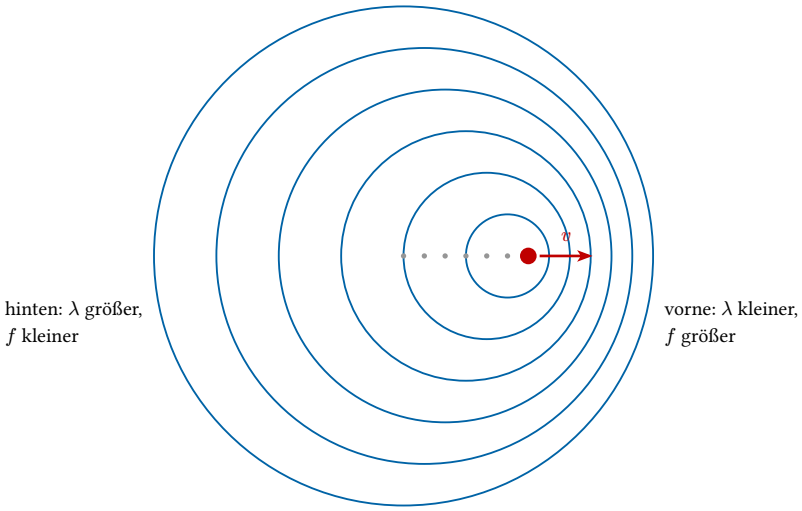


Abbildung 21: Wellenfronten einer Quelle, die sich mit der halben Schallgeschwindigkeit nach rechts bewegt. Jeder Kreis wurde ausgesandt, als die Quelle am grauen Punkt in seiner Mitte war. In Bewegungsrichtung liegen die Fronten enger, dahinter weiter auseinander.

Bewegt sich die Quelle mit v_S auf einen ruhenden Beobachter zu, ist die Wellenlänge vor ihr um die Strecke verkürzt, die sie während einer Periode zurücklegt: $\lambda' = \lambda - v_S T$. Damit wird $f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{f_0 \cdot c}{c - v_S}$. Bewegt sich stattdessen der Beobachter mit v_E auf eine ruhende Quelle zu, trifft er die Wellenberge häufiger: $f' = \frac{f_0 \cdot (c + v_E)}{c}$. Zusammengefasst (Formelsammlung, Abschnitt Akustik):

Merksatz

$$f_E = f_0 \cdot \frac{c \pm v_E}{c \mp v_S}$$

Obere Vorzeichen bei Annäherung, untere bei Entfernung. c ist die Schallgeschwindigkeit, v_E und v_S die Geschwindigkeiten von Empfänger und Sender gegenüber der Luft.

Der Doppler-Effekt wird bei der Radarkontrolle, beim Ultraschall-Doppler in der Medizin (Blutfluss) und in der Astronomie (Rotverschiebung) genutzt. Im Bildungsplan 2016 steht er nicht; in Abituraufgaben bis 2017 kam er mit angegebener Formel vor.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 163** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 36** (Hupe vor der Felswand, im Aufgabenskript).



8 Ausblick: Elektromagnetische Wellen

8.1 Wellen ohne Wellenträger Abi

Alles in diesem Skript gilt auch für elektromagnetische Wellen – mit einem großen Unterschied: Sie brauchen keinen Wellenträger. Was schwingt, sind elektrisches und magnetisches Feld, und die breiten sich auch im Vakuum aus, mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3{,}00 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen; sie lassen sich polarisieren, beugen, brechen und zur Interferenz bringen. Wie sie entstehen (Hertzscher Dipol, 3.6.4 (9)) und wie das elektromagnetische Spektrum von Radiowellen bis zur Gammastrahlung aussieht (3.6.4 (8)), steht am Ende von Skript PL3, weil man dafür den elektromagnetischen Schwingkreis braucht. Die Wellenoptik (Skript PL4) wendet dann Huygens, Gangunterschied und Interferenz auf das Licht an.

> Ausprobieren: **Hertzscher Dipol** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektromagnetische Wellen** ↗ · **Hochfrequenztechnik, Leitungen & Antennen** ↗



9 Das Wichtigste auf einen Blick

Im Abitur 2027 liegt die Formelsammlung des IQB bereit. Die rechte Spalte zeigt, was man dort nachschlagen kann:

Thema	Zusammenhang	Formelsammlung
Wellenarten	transversal: senkrecht schwingend, polarisierbar; longitudinal: längs schwingend (Schall in Luft)	nein
Grundgleichung	$c = \lambda f$; f vom Erreger, c vom Wellenträger	**steht drin**
Wellenfunktion	$y(x,\, t) = \hat{y}\sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$ für $x \leq ct$	**steht drin**
Diagramme	Momentanbild (t fest): λ ablesen; Zeitbild (x fest): T ablesen	nein
Phase	$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda}$	nein
Reflexion	festes Ende: Phasensprung π, Knoten; loses Ende: ohne Phasensprung, Bauch	nein
stehende Welle	Knotenabstand $\frac{\lambda}{2}$; zwischen zwei Knoten gleichphasig; kein Energietransport	Wellenfunktion: **steht drin** Deutung: nein
Eigenfrequenzen	gleiche Enden: $L = \frac{k\lambda}{2}$, $f_k = \frac{kc}{2L}$; verschiedene Enden: $L = \frac{(2k-1)\lambda}{4}$	**steht drin** (k ab 0)
Huygens	jeder Punkt einer Front ist Zentrum einer Elementarwelle; neue Front = Einhüllende	nein
Brechung	$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, f bleibt	**steht drin** (Optik)
Beugung	stark, wenn Öffnung $\lesssim \lambda$	nein
zwei Erreger	gleichphasig: Max. bei $\Delta s = k\lambda$, Min. bei $\left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$; $\hat{y}_{\text{res}} = 2\hat{y}\,\left\lvert\cos\left(\frac{\pi\Delta s}{\lambda}\right)\right\rvert$	nein
Polarisation	nur bei Transversalwellen möglich	nein

