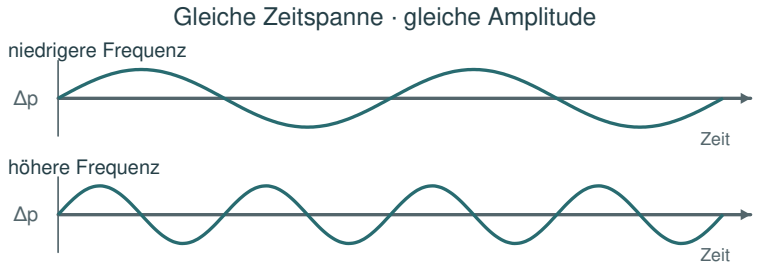
01 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Eine Schwingung breitet sich aus

Eine schwingende Lautsprechermembran bewegt benachbarte Luftteilchen. Diese beeinflussen weitere Teilchen. So erreicht eine Druckschwankung dein Ohr, obwohl die Luft nicht als Ganzes vom Lautsprecher zu dir wandert.



Zwei reine Töne über dasselbe Zeitintervall: oben weniger, unten mehr Schwingungen bei gleicher Amplitude. Die Kurven zeigen Druckänderungen an einem Ort.

1 · Teilchen bewegen sich um ihre Ruhelage

Schall ist eine mechanische Schwingung, die sich in einem Stoff ausbreiten kann. In Luft wechseln Bereiche mit höherem und niedrigerem Druck. Die Teilchen schwingen überwiegend in Ausbreitungsrichtung hin und her. Deshalb spricht man von einer **Längswelle**. Weitergegeben werden Störung und Energie. Ein einzelnes Luftteilchen bleibt dabei in der Nähe seiner Ruhelage. Auch Flüssigkeiten und feste Körper können Schall übertragen; ihre Eigenschaften beeinflussen die Ausbreitung.

2 · Frequenz und Amplitude beschreiben Verschiedenes

Die **Frequenz** gibt die Zahl der Schwingungen pro Sekunde an. Ihre Einheit ist Hertz, kurz Hz. Ein reiner Ton mit 800 Hz schwingt pro Sekunde doppelt so oft wie einer mit 400 Hz und wird höher wahrgenommen. Die **Amplitude** beschreibt die Größe der Schwingung. Bei gleichem Ton und gleichen Bedingungen führt eine größere Druckamplitude gewöhnlich zu einem lauteren Eindruck. Frequenz und Amplitude können unabhängig voneinander verändert werden.

3 · Ein Diagramm braucht eine klare Bedeutung

Eine Schallkurve kann die Druckänderung an einem festen Ort über die Zeit zeigen. Mehr vollständige Schwingungen im gleichen Zeitabschnitt bedeuten eine höhere Frequenz. Die Kurve ist eine Darstellung einer Messgröße. Die **Wellenlänge** beschreibt dagegen den räumlichen Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen. Bei gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit gehört zu höherer Frequenz eine kürzere Wellenlänge. Musik und Sprache bestehen meist aus vielen gleichzeitig auftretenden Frequenzanteilen. Für einen fairen Vergleich brauchen zwei Kurven dieselbe Zeitachse. Zähle dann vollständige Schwingungen, beispielsweise von einem Wellenberg bis zum nächsten. Zwei Kurven mit gleicher Schwingungszahl können verschiedene Amplituden haben. Damit werden die beiden Eigenschaften auch ohne Tonwiedergabe sichtbar.

Das gehört zusammen: Frequenz beschreibt die zeitliche Wiederholung, Amplitude die Größe und Wellenlänge einen räumlichen Abstand.

Wähle „Tonhöhe & Lautstärke“. Verändere zunächst nur die Frequenz, dann nur die Amplitude und vergleiche die Kurve und das Teilchenmodell.

01 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Die Kurve zeichnet Druck - nicht die Flugbahn eines Luftteilchens

Drei Eigenschaften getrennt lesen

Frequenz
Schwingungen pro Sekunde; beeinflusst bei reinen Tönen die Tonhöhe.

Amplitude
Größe der Druckschwankung; beeinflusst die Lautstärke.

Wellenlänge
Abstand zwischen gleichen Wellenzuständen im Raum.

Schallgeschwindigkeit
Ausbreitung der Störung; hängt vom Medium und seinem Zustand ab.

Die Größen beschreiben verschiedene Eigenschaften. Die Kurve der Werkstatt zeigt 4 Millisekunden an einem Ort; das Teilchenbild zeigt räumliche Bewegung.

Eine gezeichnete Schallwelle sieht oft wie eine Berg-und-Tal-Linie aus. Diese Linie bedeutet nicht, dass ein Luftteilchen auf einer solchen Bahn zum Ohr fliegt. In der Werkstatt zeigt die Kurve die **Schalldruckänderung** an einem festen Ort während eines kurzen Zeitabschnitts. Eine hohe Stelle bedeutet dort einen Druck über dem Vergleichswert, eine tiefe Stelle einen darunter. Das Teilchenmodell darüber beantwortet eine andere Frage: Wie bewegen sich die Luftteilchen? Sie schwingen längs hin und her. Die markierte Teilchengruppe bleibt nahe ihrer Ruhelage, während Bereiche größerer und kleinerer Dichte weiterwandern.

Damit ein Vergleich sinnvoll ist, musst du die Achsen beachten. Zeigen beide Kurven denselben Zeitabschnitt, bedeuten mehr vollständige Schwingungen eine höhere **Frequenz**. Eine größere Ausschlaghöhe bedeutet dagegen eine größere **Amplitude**. Bei unverändertem Medium bleibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines gewöhnlichen Schalls ungefähr gleich, wenn du die Frequenz änderst. Die Wellenlänge passt sich an: Mehr Schwingungen pro Sekunde bedeuten kürzere Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Verdichtungen. Ein höherer Ton ist deshalb nicht automatisch schneller am Ohr. Du kannst drei Fragen getrennt stellen: Wie oft wird geschwungen, wie stark wird geschwungen und wie rasch breitet sich die Störung im Medium aus?

Schall braucht einen Stoff als Übertragungsmedium. Ohne Teilchen, wie in einem idealen **Vakuum**, kann sich die betrachtete mechanische Druckwelle nicht ausbreiten. Licht ist dagegen eine elektromagnetische Welle und erreicht uns auch durch den weitgehend leeren Raum zwischen Sonne und Erde.

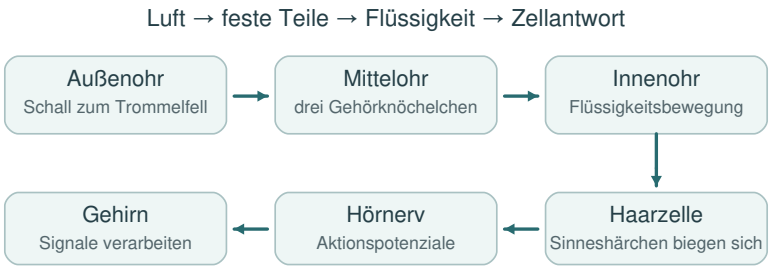
400 Hz und 800 Hz vergleichen
Halte die Modellamplitude gleich und stelle erst 400 Hz, dann 800 Hz ein. Im gleichen Zeitfenster passen beim zweiten Ton doppelt so viele Schwingungen. Die angezeigte Wellenlänge wird ungefähr halbiert. Die größere Schwingungszahl erklärt die höhere Tonhöhe, nicht eine größere Auslenkung der Kurve.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Ein hoher Ton erreicht die Wand schneller, weil seine Kurve mehr Wellen hat.
So stimmt es: In derselben Luft breiten sich die dargestellten Töne ungefähr gleich schnell aus. Höhere Frequenz bedeutet hier eine kürzere Wellenlänge, keine höhere Schallgeschwindigkeit.

02 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Das Ohr wandelt Bewegung in Signale um

Die Schallwelle erreicht zunächst das Außenohr. Danach folgen mehrere Übergänge: vom Luftdruck zur Bewegung fester Teile, weiter zur Flüssigkeit und schließlich zur Antwort einer Sinneszelle.



Luftschwingung, mechanische Übertragung, Flüssigkeitsbewegung und Zellantwort bilden aufeinanderfolgende Übergänge. Das Funktionsschema ist räumlich und zeitlich vereinfacht.

4 · Außen- und Mittelohr übertragen Schwingungen

Die **Ohrmuschel** sammelt Schall und beeinflusst seine Weiterleitung. Durch den Gehörgang erreicht er das **Trommelfell**, das zu schwingen beginnt. Dahinter liegen Hammer, Amboss und Steigbügel. Diese drei Gehörknöchelchen übertragen die Bewegung zum ovalen Fenster des Innenohrs. Das Mittelohr verbessert dabei die Übertragung zwischen Luft und Innenohrflüssigkeit. Die Ohrtrompete verbindet das Mittelohr mit dem Rachen und hilft beim Druckausgleich beiderseits des Trommelfells.

5 · Die Hörschnecke zerlegt und übersetzt

In der flüssigkeitsgefüllten **Hörschnecke**, auch Cochlea genannt, entsteht eine Wanderwelle. Verschiedene Abschnitte ihrer Basilarmembran reagieren besonders stark auf unterschiedliche Frequenzen: hohe Töne eher nahe der Basis, tiefe weiter zur Spitze. **Haarzellen** sitzen auf dieser Membran. Bewegung verbiegt ihre feinen Sinneshärchen. Dadurch ändern sich Ionenströme und die elektrische Antwort der Zelle. Die Haarzelle übersetzt somit mechanische Bewegung in einen biologischen Signalvorgang.

6 · Der Hörnerv verbindet Ohr und Gehirn

Haarzellen geben Botenstoffe an angeschlossene Nervenzellen ab. Diese erzeugen Aktionspotenziale, die über den Hörnerv und mehrere weitere Stationen ins Gehirn gelangen. Der Höreindruck entsteht durch Verarbeitung dieser Signale. Informationen aus beiden Ohren helfen unter anderem bei der Richtungsbestimmung. Die physikalische Schallwelle, die Bewegung im Innenohr und das Nervensignal sind verschiedene Vorgänge derselben Kette. Beim Erklären lohnt es sich, jeden Übergang einzeln zu benennen. Am Beispiel eines Gesprächs bedeutet das: Die Stimme erzeugt Druckschwankungen, die Ohrstrukturen übertragen die Bewegung und Nervenzellen leiten Signale weiter. Erst ihre Verarbeitung macht aus den zeitlichen Mustern verständliche Wörter. Physik, Zellbiologie und Gehirnfunktion werden an derselben Alltagshandlung sichtbar.

Das gehört zusammen: Das Ohr überträgt Schwingungen und wandelt sie über Haarzellen in Signale um. Das Gehirn verarbeitet diese Signale zum Höreindruck.

Öffne „Vom Schall zum Gehirn“. Gehe den Hörweg schrittweise durch und verändere in der vergrößerten Haarzelle die „Verbiegung der Sinneshärchen“.

02 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Das Ohr übersetzt eine Bewegung in einen anderen Signaltyp

Vier Übersetzungen auf dem Hörweg

1. Luftdruck
Druckschwankungen erreichen das Trommelfell.

→

2. Mechanische Bewegung
Gehörknöchelchen und Innenohrflüssigkeit übertragen die Schwingung.

→

3. Haarzellantwort
Die Verbiegung der Sinneshärchen verändert Ionenströme.

→

4. Nervensignale
Botenstoffe beeinflussen Nervenfasern; Impulse gelangen zum Gehirn.

Die Information bleibt zusammenhängend, ihre physikalische Form wechselt. Die Pfeile sind keine durchgehende Bahn eines Luftteilchens.

Außen- und Mittelohr leiten zunächst eine **mechanische Bewegung** weiter. Das Trommelfell bewegt sich durch Druckunterschiede. Hammer, Amboss und Steigbügel übertragen diese Bewegung zum Innenohr. Dort regt sie die Flüssigkeit und die Basilarmembran an. Die Breite und Steifigkeit der Membran ändern sich entlang der Hörschnecke. Deshalb haben verschiedene Frequenzen an verschiedenen Stellen ihr stärkstes Bewegungsmaximum. Diese räumliche Ordnung hilft, Frequenzanteile zu unterscheiden. Ein Akkord besteht aus mehreren Anteilen, die gleichzeitig verschiedene Bereiche anregen. Das Ohr muss also nicht warten, bis jeder Ton einzeln an der Reihe ist.

Die **Haarzellen** reagieren auf die mechanische Bewegung ihrer feinen Fortsätze. Eine Auslenkung in eine Richtung kann bestimmte Ionenkanäle stärker öffnen; die Gegenrichtung kann die Antwort verringern. Dadurch ändern sich die elektrische Spannung und die Botenstoffabgabe der Zelle. Angeschlossene Nervenzellen werden entsprechend beeinflusst und leiten Aktionspotenziale weiter. Der Schall ist an dieser Stelle nicht mehr als Luftdruckwelle unterwegs. Die Information wird nun durch biologische Signale getragen. Im Gehirn werden die Muster unter anderem für Tonhöhe, zeitlichen Verlauf und Richtung ausgewertet. Dabei werden Informationen beider Ohren verglichen, etwa Unterschiede in Ankunftszeit und Schallstärke.

Zum Innenohr gehört außerdem das **Gleichgewichtsorgan**. Seine Bogengänge erfassen Änderungen der Drehbewegung des Kopfes; andere Bereiche reagieren auf geradlinige Beschleunigung und die Lage zur Schwerkraft. Auch dort übersetzen Haarzellen mechanische Auslenkungen in Zellantworten. Das Gehirn verbindet diese Informationen mit dem Sehen und Rückmeldungen aus dem Körper.

Warum eine bekannte Stimme erkennbar bleibt
Eine Stimme enthält mehrere Frequenzen und verändert sich über die Zeit. Die Hörschnecke ordnet Frequenzanteile; Nervensignale bilden zeitliche Muster. Das Gehirn verknüpft diese mit Erfahrung. Daher kann dieselbe Person beim Sprechen verschiedener Wörter erkennbar bleiben. Das geht über das bloße Wahrnehmen eines einzelnen reinen Tons hinaus.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Der Hörnerv leitet die Schallwelle wie ein Schlauch bis ins Gehirn.
So stimmt es: Die Haarzellen wandeln mechanische Bewegung in eine Zellantwort um. Der Hörnerv leitet Aktionspotenziale; im Nerv läuft keine Luftdruckwelle wie im Gehörgang.

03 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Schallwege erklären und das Gehör schützen

Ein Ruf kann von einer Felswand zurückkommen. Ein Kopfhörer bringt die Quelle dicht ans Ohr. Beide Beispiele werden verständlich, wenn wir Weg, Zeit und Stärke des Schalls gemeinsam betrachten.



Für ein Echo wird der Schallweg doppelt zurückgelegt. Das Zahlenbeispiel verwendet 343 m/s in Luft bei ungefähr 20 °C; Zeichnung und Abstände sind schematisch.

7 · Ein Echo hat einen Hin- und Rückweg

Schall kann an einer Fläche reflektiert werden. Kommt er ausreichend verzögert zurück, hören wir ein **Echo**. Für die Entfernung zählt die halbe zurückgelegte Strecke. Bei etwa 20 °C breitet sich Schall in Luft mit ungefähr 343 m/s aus. Die Temperatur und das Medium beeinflussen die Geschwindigkeit. Im Beispiel dauert der Hin- und Rückweg 0,2 s. Dabei bezeichnet d die Entfernung zur Wand, c die Schallgeschwindigkeit und t die Zeit für den Hin- und Rückweg.

Grundgleichung: d = c · t : 2
Einsetzen: d = 343 m/s · 0,2 s : 2
Ergebnis: d = 34,3 m. Die Wand liegt also 34,3 m entfernt.

8 · Lautstärke entsteht aus mehreren Einflüssen

Die Stärke des ankommenden Schalls hängt unter anderem von der Quelle, dem Abstand und der Umgebung ab. Die wahrgenommene Lautstärke hängt zusätzlich von Frequenz und Hörvermögen ab. Ein **Schallpegel** wird häufig in Dezibel angegeben. Diese Skala ist logarithmisch: Gleiche Pegelabstände stehen für gleiche Verhältnisse der Schallintensität. Die Amplitude in Prozent in der Werkstatt bezeichnet eine relative Modellgröße; sie wird durch die Geräte-Lautstärke zusätzlich beeinflusst.

9 · Empfindliche Sinneszellen erhalten

Starker Schall kann empfindliche Strukturen des Innenohrs schädigen. Entscheidend sind sowohl die Stärke als auch die Dauer der Belastung. Sehr laute kurze Geräusche können ebenfalls Schäden verursachen. Schutz entsteht durch geringere Lautstärke, mehr Abstand, Ruhepausen und passenden Gehörschutz bei lauten Tätigkeiten. Das passt zum Hörweg: Die Haarzellen sind ein empfindlicher Übergang zwischen Bewegung und Nervensignal. Ihr Erhalt unterstützt die Verständigung mit anderen Menschen und die Wahrnehmung der Umgebung.

Das gehört zusammen: Physikalische Schallwege und biologische Verarbeitung ergänzen sich. Stärke und Dauer bestimmen gemeinsam die Belastung des Gehörs.

Fachbücher und Quellen stehen auf Seite 7. Die Onlinefassung verlinkt außerdem die passenden Lehrbuchkapitel.

03 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Echozeit ist nicht gleich Entfernung

Warum die Entfernung halbiert wird

1. Quelle → Wand
Der Schall legt einmal den Wandabstand zurück.

→

2. Reflexion an der Wand
Ein Teil des Schalls wird zur Quelle zurückgeworfen.

→

3. Wand → Ausgangspunkt
Der Schall legt den gleichen Abstand ein zweites Mal zurück.

Hinweg und Rückweg ergeben zusammen die gemessene Laufstrecke. Die angezeigte Entfernung zur Wand ist nur eine dieser Teilstrecken.

Wenn Schall ausgesendet und an einer Wand zurückgeworfen wird, durchläuft er den Abstand zweimal. Die gemessene **Laufzeit** gehört zum Hin- und Rückweg zusammen. Für die Entfernung musst du deshalb die gesamte Schallstrecke halbieren. Verdoppelst du den Wandabstand bei gleicher Schallgeschwindigkeit, verdoppeln sich beide Teilstrecken und damit auch die Laufzeit. Ändert sich dagegen das Medium, kann dieselbe Entfernung zu einer anderen Zeit führen. Eine reine Zeitangabe genügt deshalb nicht. Du musst zusätzlich wissen, mit welcher Ausbreitungsgeschwindigkeit gerechnet wird. Die Werkstatt verwendet 343 Meter pro Sekunde für Luft bei ungefähr 20 Grad Celsius.

In einem großen Raum wird Schall häufig an mehreren Flächen zurückgeworfen. Treffen viele Reflexionen kurz nacheinander ein, können sie sich zu einem **Nachhall** überlagern. Eine gut getrennte Wiederholung nennen wir Echo. Vorhänge, weiche Oberflächen und andere Materialien können einen Teil der Schallenergie aufnehmen und die Reflexion verändern. Das erklärt, warum sich zwei ähnlich große Räume akustisch unterscheiden können. Lauter zu rufen macht den Schall dabei nicht wesentlich schneller. Für das Hörvermögen zählen außerdem Schallstärke und Belastungsdauer. Die Animation darfst du beliebig langsam verfolgen; ihre Laufzeitangabe wird unabhängig vom bewusst verlangsamten Bild berechnet.

Der Schutz des Gehörs beginnt daher bei der Belastung: weniger Lautstärke, kürzere Dauer und bei lauten Tätigkeiten geeigneter Gehörschutz. Eine angenehme oder vertraute Musik ist nicht automatisch unschädlich. Entscheidend bleiben die physikalische Belastung und die Dauer, nicht die Vorliebe für den Klang.

Zwei Wandabstände prüfen
Vergleiche im Modell 20 Meter und 40 Meter Wandabstand. Die gesamten Schallwege betragen 40 beziehungsweise 80 Meter. Bei unveränderten 343 Metern pro Sekunde verdoppelt sich deshalb die berechnete Laufzeit. Du kannst diese Beziehung erkennen, bevor du einzelne Zeitwerte ausrechnest oder eine Formel einsetzt.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Für die Wandentfernung multipliziere ich einfach Schallgeschwindigkeit und Echozeit.
So stimmt es: Das Produkt ergibt den gesamten Hin- und Rückweg. Die Wandentfernung ist die Hälfte davon. Die Zeit muss zum vollständigen Echo passen, nicht nur zum Hinweg.

Wissen anwenden und weiterdenken

Drei ergänzende Entdeckeraufträge. Erkläre deine Beobachtungen mit den Zusammenhängen aus dem Wissenstext.

1 · Tonhöhe & Lautstärke

Ausprobieren: Stelle die Frequenz bei gleicher Amplitude von 400 auf 800 Hz. Verändere danach nur die Amplitude und starte die Teilchenbewegung.

Beobachten: Was verändert sich an Schwingungszahl, Kurvenhöhe und Wellenlänge? Bleibt die markierte Teilchengruppe in der Nähe ihres Platzes?

Erklären: Warum braucht man sowohl das Teilchenbild als auch die Druckkurve, um den Schall verständlich zu erklären?

Modellgrenze: Die Bewegung ist stark verlangsamt. Die Amplitude in Prozent ist keine Dezibelmessung; das Diagramm kann ohne Tonwiedergabe untersucht werden.

2 · Vom Schall zum Gehirn

Ausprobieren: Gehe den Hörweg bis zur Hörschnecke weiter. Verändere im vergrößerten Bild die „Verbiegung der Sinneshärchen“.

Beobachten: An welcher Station wechselt die Erklärung von Schwingung zu elektrischer Zellantwort? Was zeigen die gelben Punkte?

Erklären: Warum kann eine Haarzelle als Übersetzer zwischen mechanischem Vorgang und Nervensignal beschrieben werden?

Modellgrenze: Gezeigt ist eine erregende Auslenkungsrichtung. Zahl, Größe und Bewegung der Sinneshärchen und Botenstoffe sind schematisch vereinfacht.

3 · Ausbreitung & Echo

Ausprobieren: Stelle den „Abstand zur Wand“ auf 20 Meter und dann auf 40 Meter. Verfolge mit „Position auf dem Hin- und Rückweg“ beide Strecken.

Beobachten: Wie ändern sich Gesamtschallweg und angezeigte Zeit? Wann erreicht der bewegte Punkt die Wand, wann den Ausgangspunkt?

Erklären: Warum wäre das Ergebnis doppelt zu groß, wenn du die gesamte Laufstrecke als Wandentfernung angibst?

Modellgrenze: Der Bildschirmabstand und das Animationstempo sind schematisch. Mehrfachreflexionen und Schallabsorption im Raum werden nicht berechnet.

Interaktive Werkstatt öffnen →

Fachliche Quellen und weiterführende Literatur

College Physics 2e
Noise-Induced Hearing Loss
Taschenatlas Physiologie
Fachinformation · www.nidcd.nih.gov
Anatomy and Physiology 2e