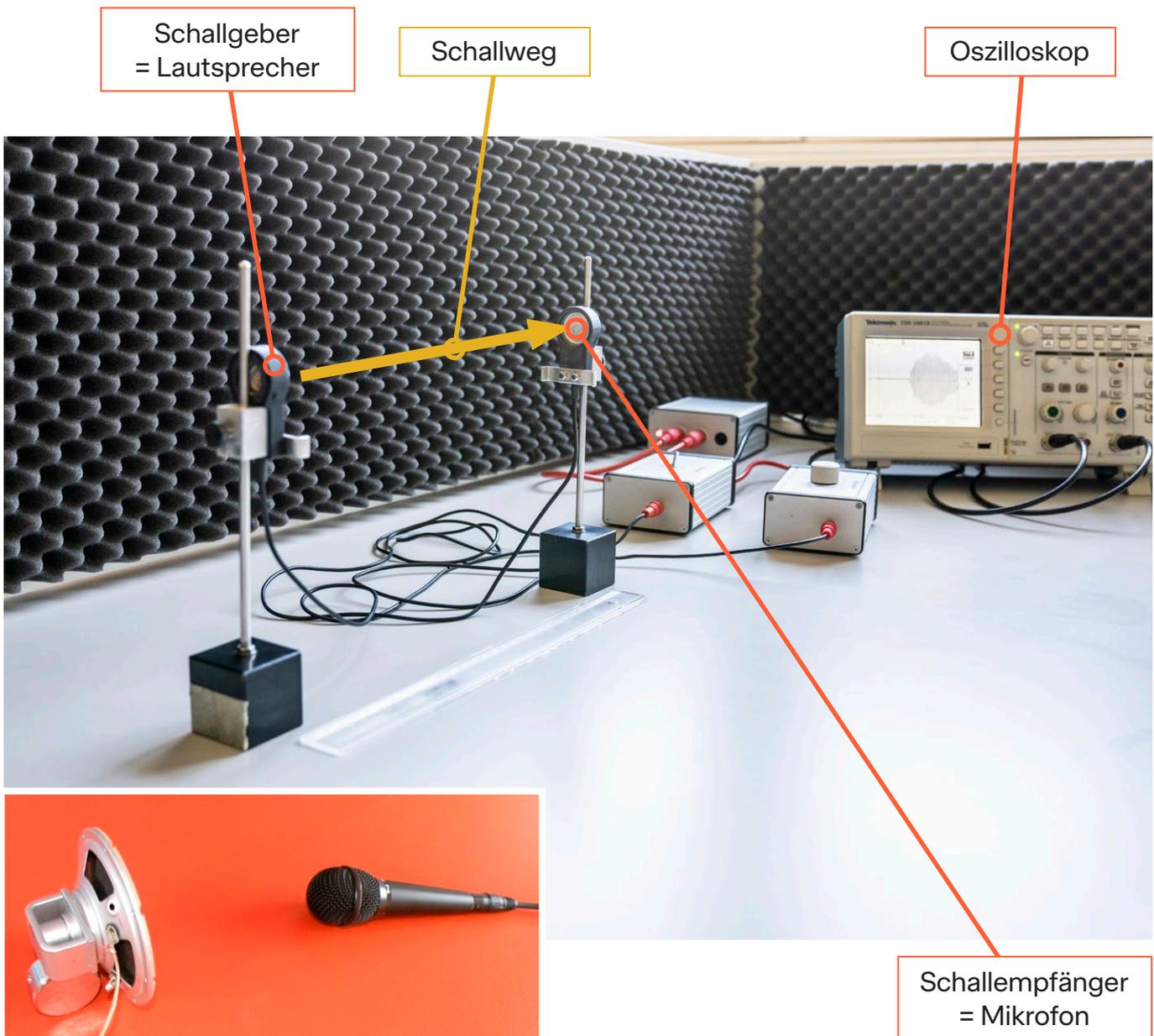


Experimente mit Schallwellen — am PSI iLab



Unsere Apparaturen zum Beobachten von Schallpulsen

Das Wichtigste vorab: Der Schallgeber (Lautsprecher) erzeugt ein akustisches Signal, welches vom Schallempfänger (Mikrofon) aufgenommen wird. Der Empfänger wandelt das akustische Signal in ein elektrisches Signal um und leitet es analog weiter an das Oszilloskop. Auf dem Bildschirm siehst du das Signal graphisch dargestellt.



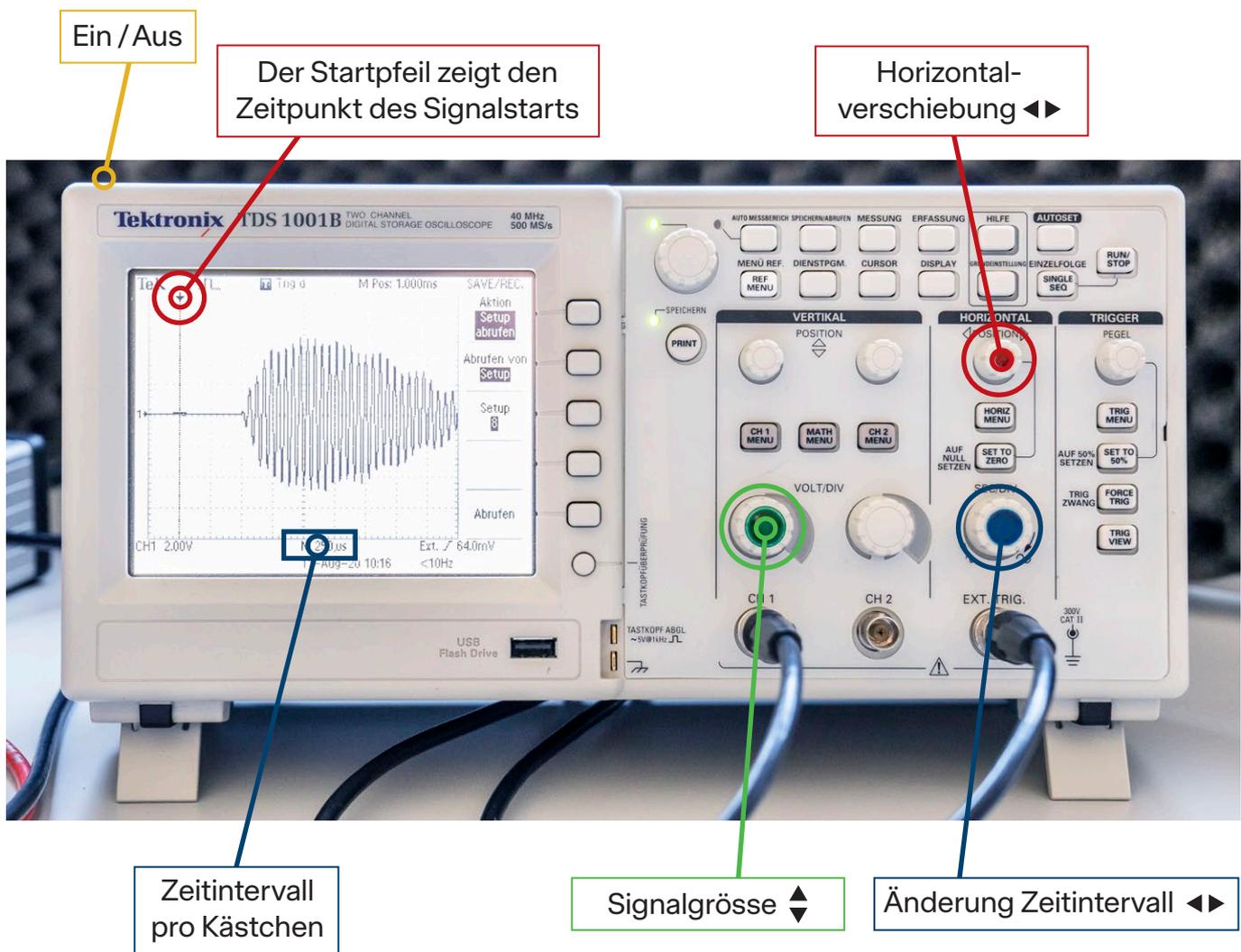
Das Oszilloskop

Sowohl der Schallgeber wie auch der Schallempfänger sind mit dem Oszilloskop verbunden. Das Gerät zeigt uns einerseits, wann der Schallgeber das Signal erzeugt (kleiner «Startpfeil» oben links).

Andererseits zeichnet es das beim Schallempfänger eintreffende Signal entlang der Zeitachse (von links nach rechts) auf. Das Zeitintervall für das Durchlaufen eines Kästchens (Karo) wird am unteren Rand angezeigt.

- s = Sekunden
- ms = Millisekunden = 0.001 Sekunden
- μ s = Mikrosekunden = 0.000'001 Sekunden
- ns = Nanosekunden = 0.000'000'001 Sekunden

? Was passiert, wenn du an den rot, blau und grün bezeichneten Knöpfen vorsichtig drehst? Wie verändert sich das Signal, wenn du Schallgeber und -empfänger voneinander entfernst oder näher zueinander bringst? Was, wenn du deine Hand in den Schallweg hältst?



Experiment 1:

Schallgeschwindigkeit in Luft

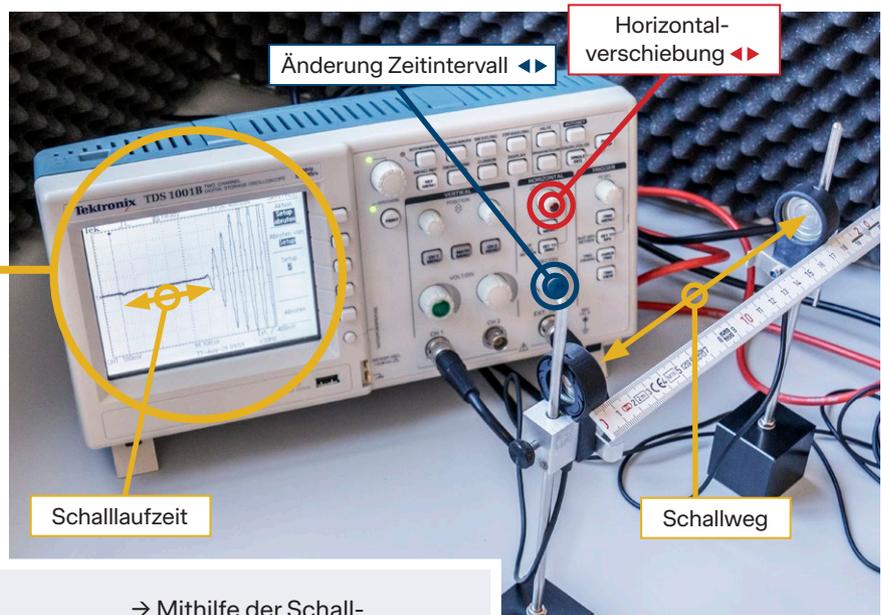
Wenn du die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmen möchtest, musst du messen, wie lange der Schall braucht, um vom Schallgeber zum Schallempfänger zu gelangen. Auf dem Oszilloskop ist diese Schalllaufzeit die Zeitdauer zwischen dem kleinen Startpfeil und dem Anfang des Signals.

- Dreh an den beiden Knöpfen «Änderung Zeitintervall» und «Horizontalverschiebung», bis du die Schalllaufzeit so gross wie möglich auf dem Bildschirm siehst.
- Verschiebe die Schallsonden (Schallgeber und Schallempfänger) so, dass der Schallweg auf dem Bildschirm genau eine beliebige Anzahl ganze Kästchen beträgt.
- Berechne die Zeit: Anzahl Kästchen x «Zeitintervall» und rechne den Wert in Sekunden [s] um.
- Miss mit dem Massstab die Strecke zwischen Schallgeber und Schallempfänger und rechne den Wert in Meter [m] um.
- Berechne die Schallgeschwindigkeit

$$v = \frac{\text{Strecke [m]}}{\text{Zeit [s]}}$$
 in Meter pro Sekunde [m/s].

5 Kästchen à 100 μs = 500 μs
 500 μs : 1000 $\mu\text{s}/\text{ms}$ = 0.5 ms
 0.5 ms : 1000 ms/s = 0.0005 s

μs = Mikrosekunden ↻ : 1000
 ms = Millisekunden ↻ : 1000
 s = Sekunden



→ Mithilfe der Schallgeschwindigkeit kannst du herausfinden, wie weit ein Gewitter entfernt ist.

Blitz (Licht)
ca. 300 000 km/s

Donner (Schall)
ca. 0,3 km/s

Verzögerung

Sekunden zählen
 1 - 2 - 3 - 4 - ...
 3 Sekunden = 1 Kilometer Entfernung
 6 Sekunden = 2 Kilometer Entfernung

Experiment 2:

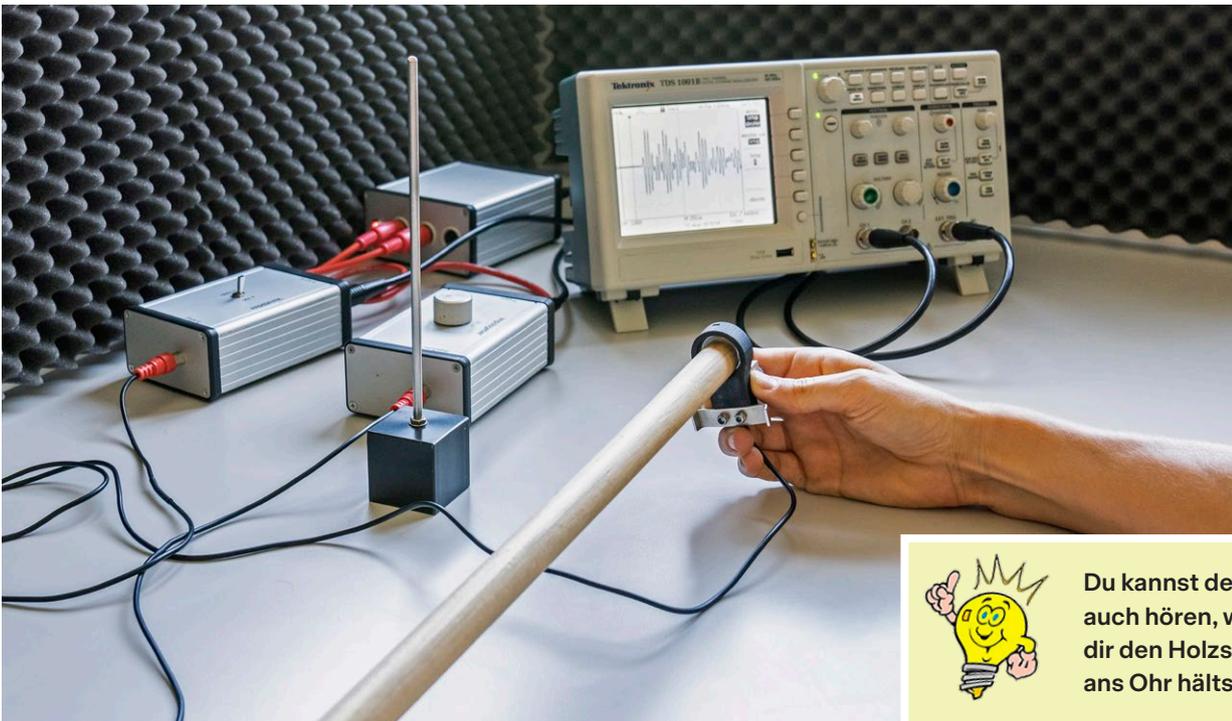
Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien

Wie lange braucht der Schall, um vom Schallgeber durch einen Holz- oder Plexiglasstab zum Schallempfänger zu gelangen? Auf dem Oszilloskop ist diese Schalllaufzeit die Zeitdauer zwischen dem kleinen Startpfeil und dem Anfang des Signals.

- Nimm die beiden Schallsonden von ihrer Halterung und leg den Holz- oder Plexiglasstab zwischen die Sonden.
- Drück die Sonden leicht (!) gegen die Enden des Stabs, damit das Signal auf dem Oszilloskop gut sichtbar wird.
- Dreh an den beiden Knöpfen «Änderung Zeitintervall» und «Horizontalverschiebung», bis du die Schalllaufzeit so gross wie möglich auf dem Bildschirm siehst.
- Berechne die Zeit: Anzahl Kästchen x «Zeitintervall». Achte auf die Masseinheit (ms, μ s, ns) und rechne den Wert in Sekunden [s] um.
- Berechne die Schallgeschwindigkeit $v = \frac{\text{Strecke [s]}}{\text{Zeit [t]}}$ in Meter pro Sekunde [m/s]. Die Stäbe sind 1 Meter lang.



Was stellst du fest, wenn du deinen berechneten Wert mit der Schallgeschwindigkeit in Luft vergleichst?



Du kannst den Schall auch hören, wenn du dir den Holzstab direkt ans Ohr hältst.

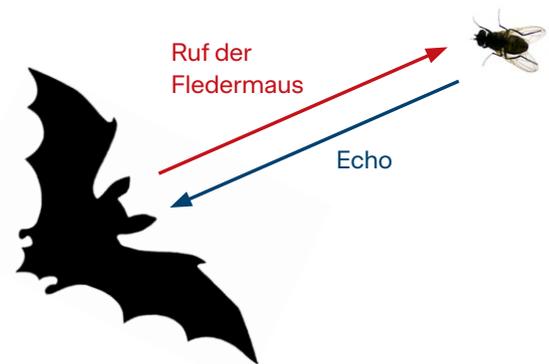
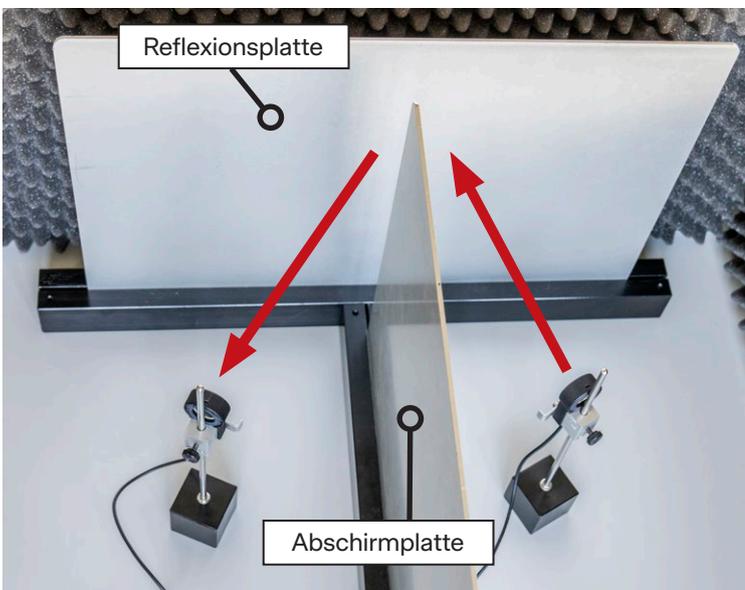
→ Fñhr dieses Experiment auch mit anderen Materialien durch, zum Beispiel mit einem mit Gas (CO₂ oder Helium) gefüllten Ballon. Vergleich anschliessend die Schallgeschwindigkeiten.

Experiment 3:

Wie «sieht» die Fledermaus?

Fledermäuse verlassen sich bei ihrer Orientierung primär auf den Gehörsinn. Mit Hilfe der sogenannten Ultraschall-Echoortung können sie sich präzise im Raum bewegen und nehmen kleinste Objekte wahr. Doch wie funktioniert das?

- Richte die beiden Schallsonden gegen eine Platte und stell dazwischen eine weitere Platte zur Abschirmung (s. Foto).
- Versuch das Echo auf dem Oszilloskop zu sehen. Wenn du die Reflexionsplatte bewegst, verschiebt sich das Signal vor und zurück.
- Dreh die beiden Schallsonden (jede einzeln), bis das Signal am grössten ist.
- Wohin sind die beiden Sonden gerichtet?



- Entferne die Reflexionsplatte. Die Schallsonden sollten nun auf die Schallschutzwände (dunkler Schaumstoff) gerichtet sein.
- Experimentier nun mit verschiedenen grossen «Käfern» (Heft, Massstab, Bleistift, usw.). Fähr sie vor der «Fledermaus» (vor den Schallsonden) vorbei und beobachte das Signal auf dem Oszilloskop. Achte dabei darauf, dass der Schall nicht an deiner Hand reflektiert wird.
- Wie breit ist der kleinste «Käfer», den die «Fledermaus» noch gut «sieht»?



Der Schall der Fledermaus in unserem Experiment hat 2 cm Wellenlänge. Fledermäuse erzeugen Ultraschall mit Wellenlängen um 0.5–1 cm. Welche Insekten können sie am besten «sehen»? Was hörst du, wenn du im Auto bei offenem Fenster an Bäumen vorbeifährst?



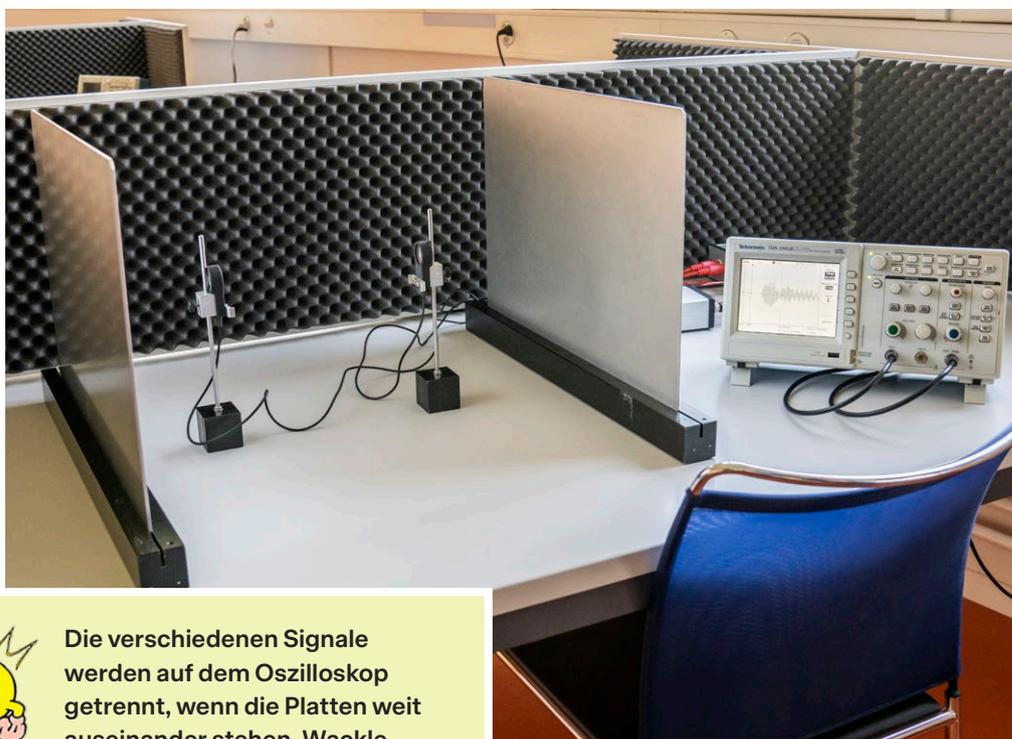
Experiment 4:

Schall im Raum

Zwischen zwei Wänden gelangt der Schall über mehrere Wege vom Schallgeber bis zum Schallempfänger. Wenn du mit verbundenen Augen in eine grosse Halle (zum Beispiel eine Kathedrale oder einen Konzertsaal) geführt wirst, ahnst du die Grösse der Halle dank der Reflexionen (es hallt).



Versuch herauszufinden, welche Signale auf dem Oszilloskop welchen Schallwegen entsprechen. Welches ist der komplizierteste Weg, den du findest? Kannst du den Schallgeber und -empfänger zwischen den Platten so anordnen, dass möglichst wenige Signale entstehen?



Die verschiedenen Signale werden auf dem Oszilloskop getrennt, wenn die Platten weit auseinander stehen. Wackle an den Platten um zu sehen, welche Signale mit welcher Platte zusammenhängen.



Foto: Thomas Gerstendörfer

Experiment 5:

Wie funktioniert «Noise Cancelling»?

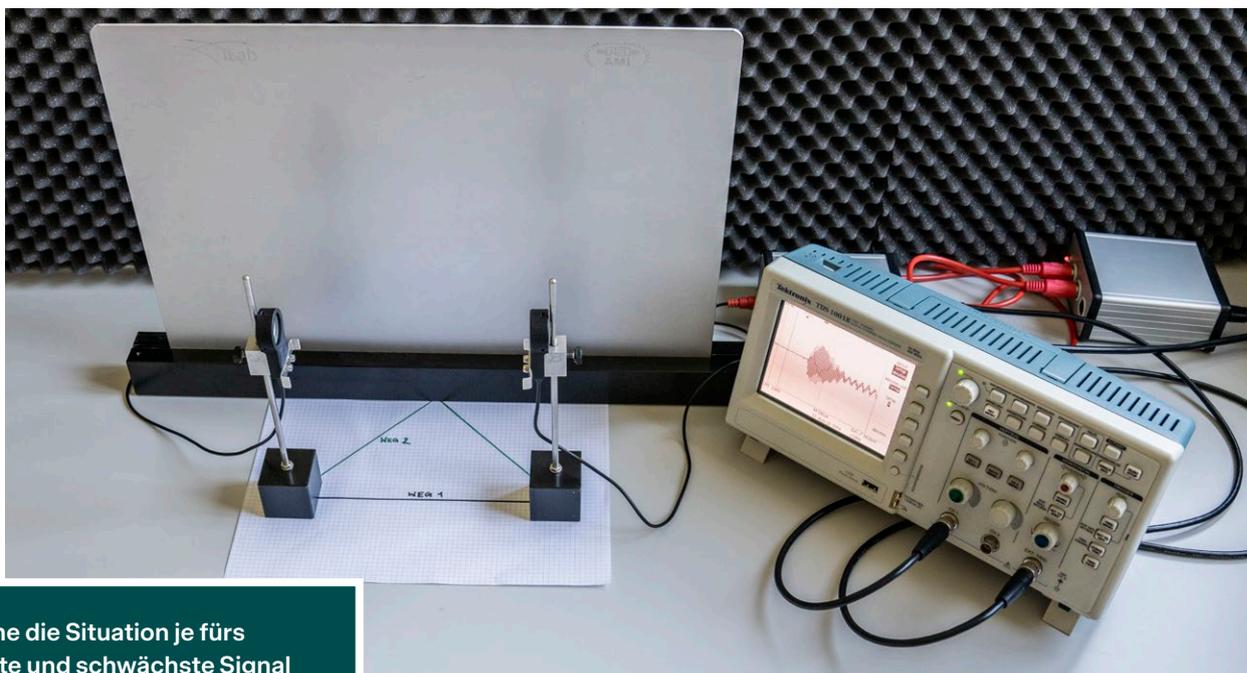
- Stell die beiden Schallsonden in der Nähe einer Platte auf einem Blatt Papier einander gegenüber (s. Foto).
- Schieb das Papier mit den beiden Schallsonden langsam etwas vor und zurück.
- Was passiert mit dem Schallsignal?



Bei welcher Anordnung ist das Signal auf dem Oszilloskop am kleinsten oder am grössten?



→ Beim Empfänger treffen zwei Schallwellen gleichzeitig ein. Je nach Weglänge verstärken sie sich, schwächen sich ab oder löschen sich sogar aus. Dieser Vorgang heisst Überlagerung oder (konstruktive resp. destruktive) Interferenz. Gehst du einer Betonmauer entlang, klingen Geräusche aus der Umgebung (z. B. von Leuten, Autos etc.) anders als gewohnt. Beobachte diesen Effekt bei der nächsten Gelegenheit.



Zeichne die Situation je fürs stärkste und schwächste Signal auf dem Papier auf.
Miss auf dem Blatt mit dem Massstab jeweils den direkten und den indirekten Weg (in cm).



Noise Cancelling-Kopfhörer nutzen die destruktive Interferenz: Ein Mikrofon im Kopfhörer misst die Umgebungsgeräusche und der Kopfhörer spielt dieses Signal (zusätzlich zu Musik/Funk) um eine halbe Wellenlänge versetzt ab. So wird der Umgebungslärm ausgelöscht.

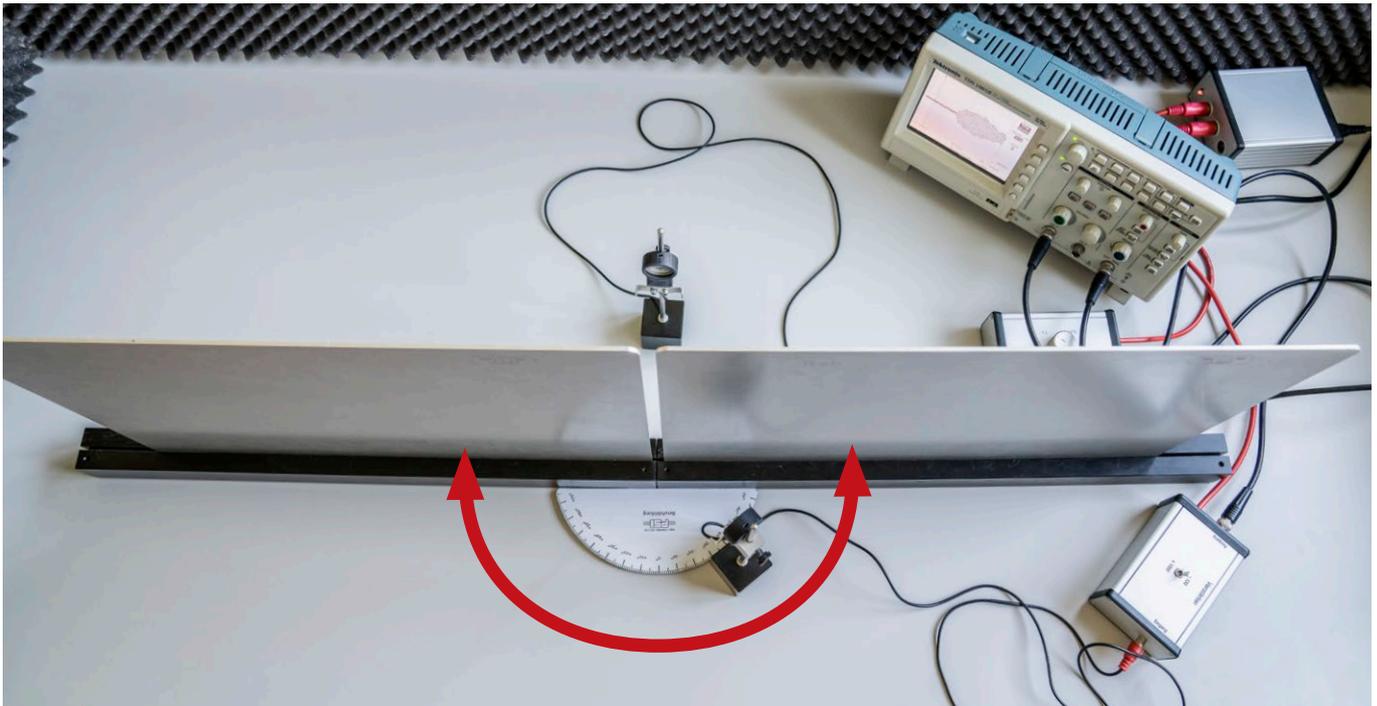
Experiment 6:

Geht Schall um die Ecke?

- Stell zwei silbrige Platten nebeneinander mit einem Spalt von zuerst 1 cm und danach 10 cm auf (s. Foto).
- Platzier den Schallgeber auf der einen Seite der Platte ca. 10 cm von den Platten entfernt. Er soll gegen den Spalt gerichtet sein.
- Fahr nun mit dem Schallempfänger auf der anderen Seite der Platten in einem Halbkreis entlang der Winkelmessplatte um den Spalt (s. Foto). Die Sonde muss dabei immer gegen die Mitte des Spalts gerichtet sein.
- Beobachte währenddessen das Signal. Was geschieht?



Wie verändert sich die Signalgrösse bei einem Spalt von 10 cm, wie bei 1 cm? Vergleich deine Beobachtungen.



→ Der Schall geht nur dann gut um die Ecke, wenn die Spaltbreite kleiner ist als die Wellenlänge des Schalls (hier 2 cm). Dieser Vorgang heisst **Beugung am Spalt**.

→ So wird klar, weshalb Bassmusiktöne (grosse Wellenlängen, um 3 m) besser aus einer Disco herausdröhnen als hohe Töne (kurze Wellenlängen, um 0.3 m). Für die tiefen Töne ist die Türöffnung von 1.5 m kleiner als die Wellenlänge.



Experiment 7:

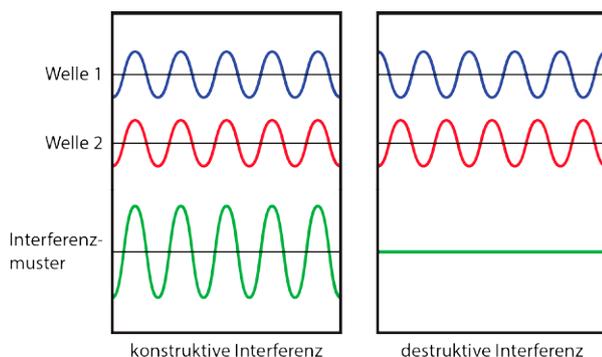
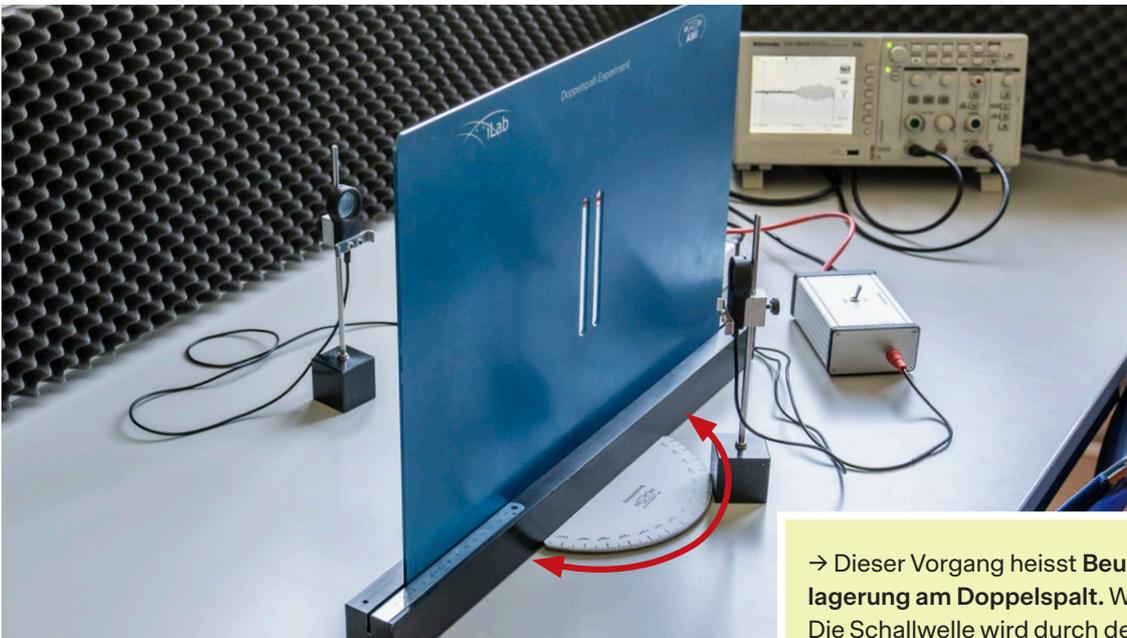
Mit zwei Spalten wird's spannend!

Die Spalten der blauen Doppelspaltplatte sind je 1 cm breit, demnach kleiner als die Wellenlänge in unserem Experiment. Die Schallwellen werden also gut gebeugt (siehe Experiment 6).

- Stell den Schallgeber auf der einen Seite der Platte ca. 10 cm vor den Doppelspalt.
- Beweg nun den Schallempfänger auf der anderen Seite der Platte halbkreisförmig entlang der Winkelmessplatte um den Doppelspalt (s. Foto).
- Beobachte währenddessen das Signal. Was geschieht?



Was passiert, wenn du einen Spalt abdeckst?

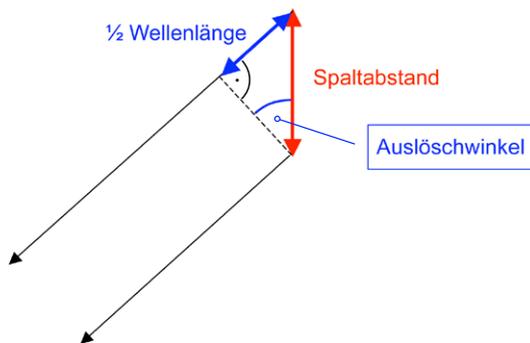


→ Dieser Vorgang heisst **Beugung und Überlagerung am Doppelspalt**. Was passiert dabei? Die Schallwelle wird durch den Doppelspalt in zwei Wellen aufgeteilt. Laufen die beiden Wellen in der gleichen Phase, verstärken sie sich gegenseitig (**konstruktive Interferenz**). Hat nun eine Welle einen längeren Weg als die andere, treffen sie zu unterschiedlichen Zeiten auf den Schallempfänger (**Phasenverschiebung**). Ist der längere Weg genau eine halbe Wellenlänge (= 1 cm) grösser, trifft ein Wellenberg der Welle 1 auf ein Wellental der Welle 2: die beiden Wellen löschen sich gegenseitig aus (**destruktive Interferenz**).

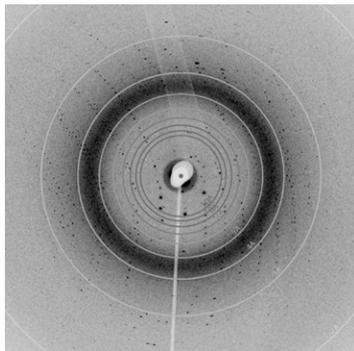
Zu Experiment 7:

So werden Abstände zwischen Atomen gemessen

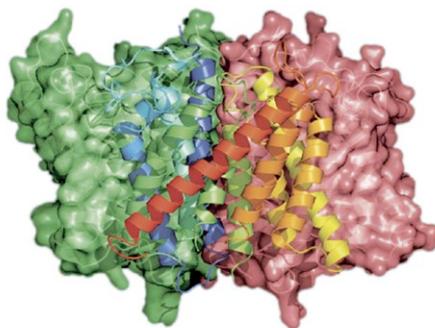
Forscherinnen und Forscher am Paul Scherrer Institut bestimmen mit dem physikalischen Prinzip der Interferenz den Abstand zwischen den Atomen in einem Molekül (mehratomiges Teilchen). Sie benutzen dazu Röntgenlicht aus der SLS* oder aus dem SwissFEL*.



Beachte das rechtwinklige Dreieck: Aus dem Auslöschwinkel und der bekannten (halben) Wellenlänge kann man den Spaltabstand berechnen. Analog können Atomabstände in einem Molekül bestimmt werden. Die Beugung wird dabei nicht durch Spaltöffnungen, sondern durch Atome erzeugt. Um Atomabstände zu messen, braucht es jedoch ganz kleine Wellenlängen von 0,1 nm.



Deshalb benutzen die Forscherinnen und Forscher am Paul Scherrer Institut anstelle von Schallwellen hochenergetisches Röntgenlicht mit entsprechend kurzen Wellenlängen, um Molekülstrukturen zu analysieren. Aus den Diffraktionsmustern eines Proteinkristalls (s. Bild links) lassen sich so die Positionen der Atome im Protein (Eiweiss) bestimmen.



Das detaillierte Wissen über die 3-D-Struktur eines Proteins hilft uns dabei, dessen Funktion in unserem Körper besser zu verstehen. Zudem dient das Wissen in vielen Fällen als Grundlage für die Entwicklung von neuen Medikamenten gegen verschiedenartige Krankheiten.

* SLS = Synchrotron Lichtquelle Schweiz oder Swiss Light Source,
SwissFEL = Schweizer Freie-Elektronen-Röntgenlaser oder Swiss X-ray free-electron laser

Experiment 8:

Kann man Schallwellen fokussieren?

Schall kann nicht wie sichtbares Licht mit einer Glaslinse fokussiert werden. Es geht aber mit einer sogenannten **Fresnel-Zonenplatte**, die so berechnet wird, dass die Wegunterschiede der Wellen durch aufeinanderfolgende Kreisspalten gerade eine Wellenlänge (in unserem Fall 2 cm) ausmachen. So überlagern sich die Teilwellen additiv (konstruktive Interferenz): Im Brennpunkt (Fokus) ist die Intensität des Signals am grössten!

- Platzier den Schallgeber ca. 1 m vor der Zonenplatte.
- Such mit dem Schallempfänger auf der gegenüberliegenden Seite der Platte den Ort, wo das Signal am grössten ist (Fokus).

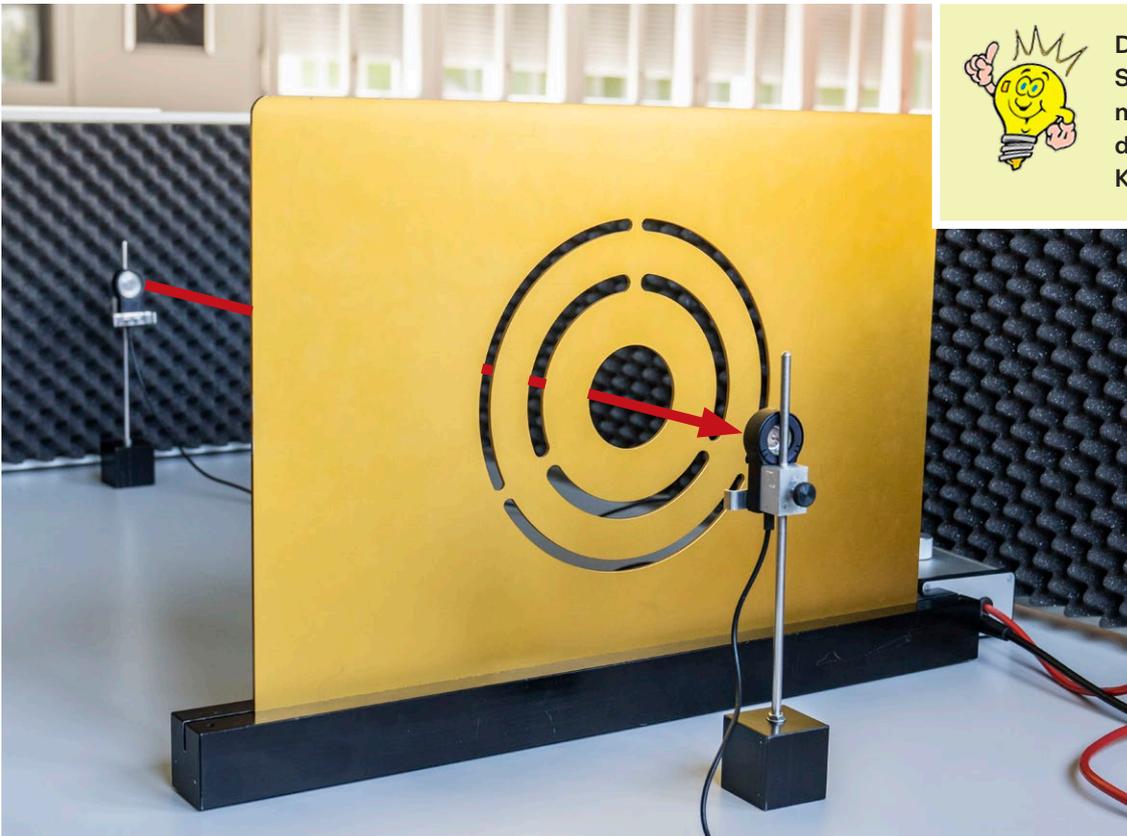


Welchen Abstand hat der Schallempfänger zur Platte?

- Merk dir, wo der Fokus war. Platzier den Schallgeber anschliessend in 20 cm Entfernung zur Platte.



Wo ist der Fokus jetzt? Kannst du das Gesetz ergänzen?
«Je näher der Schallgeber bei der Platte, desto ... ist der Fokus.»

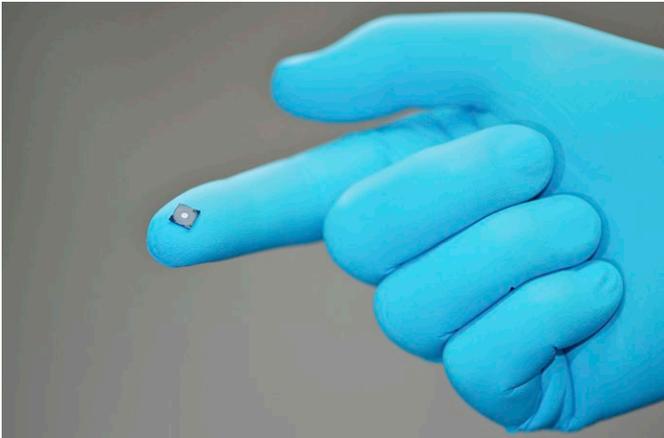


Die beiden Schallsonden müssen exakt auf der Höhe der Kreismitte sein.

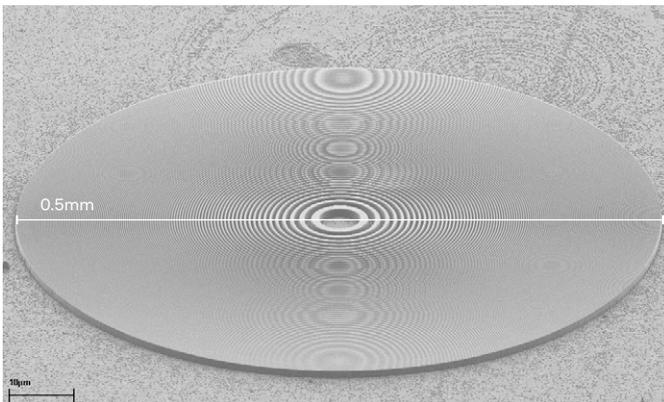
Zu Experiment 8:

Zonenplatten für die Forschung

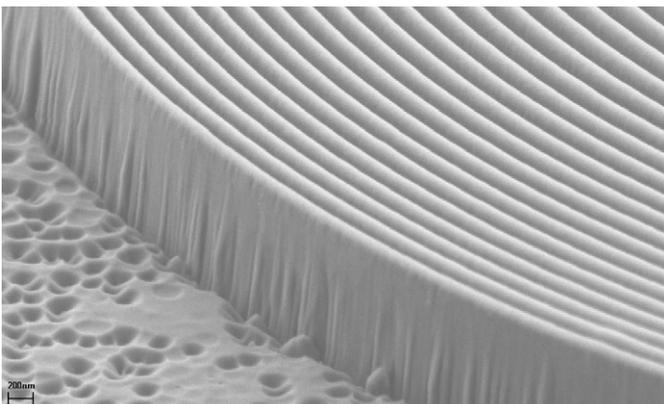
Das gleiche Prinzip wird auch für die Bündelung von Röntgenstrahlen verwendet, weil diese genau wie Schallwellen nicht auf Glaslinsen reagieren. Da die harten Röntgenlaserstrahlen am SwissFEL* besonders intensiv sind, mussten die Forscherinnen und Forscher bei der Entwicklung der Fresnel-Zonenplatten auf ein besonders robustes Material zurückgreifen: Diamant.



Die Röntgenstrahlung am SwissFEL* und an der SLS* wird mit Fresnel-Zonenplatten gebündelt – allerdings mit sehr kleinen, da sich die Wellenlängen zur Messung von Atomen in der Grössenordnung der Atomabstände befinden, also bei rund 0.1 nm.



Der Durchmesser der diamantenen Zonenplatten zur Nano-Fokussierung beträgt 0.5 mm, ist also von Auge knapp sichtbar. Das Bild links zeigt eine Fresnel-Zonenplatte aus dem SwissFEL*, aufgenommen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM).

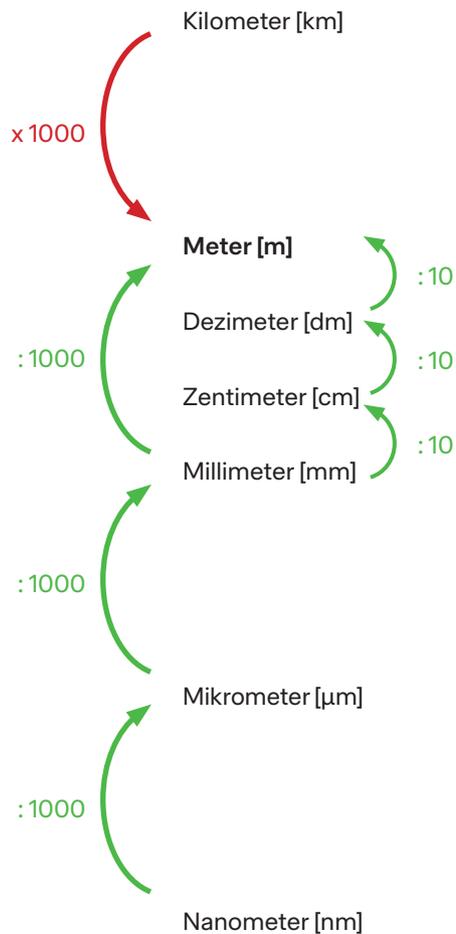


Die Fresnel-Zonenplatten bestehen aus konzentrischen Ringstrukturen. Um kurzwellige Lichtstrahlen zu bündeln, müssen diese entsprechend schmal sein: Die äusseren Ringe sind gerade mal 100 nm dick, zum Mittelpunkt hin werden sie dicker (siehe REM-Aufnahme links).

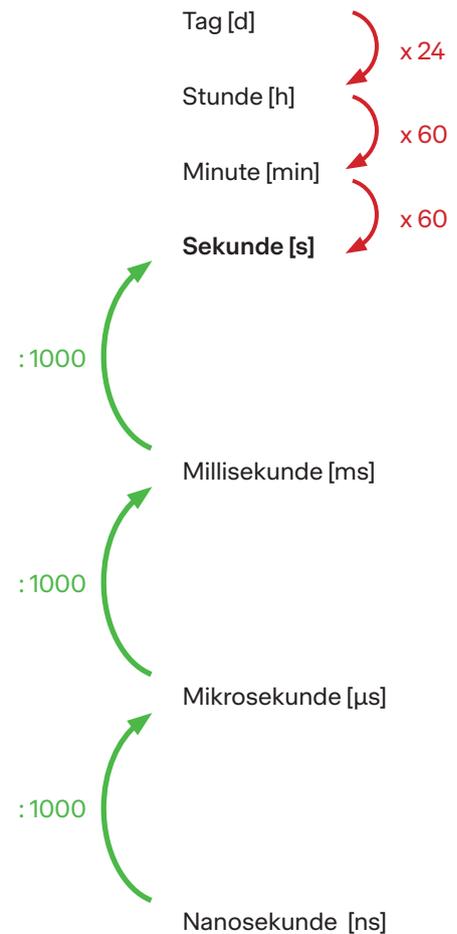
* SLS = Synchrotron Lichtquelle Schweiz oder Swiss Light Source,
SwissFEL = Schweizer Freie-Elektronen-Röntgenlaser oder Swiss X-ray free-electron laser

Umrechnungshilfe für Strecke und Zeit

Strecke [s]



Zeit [t]

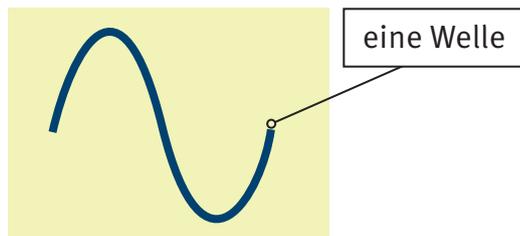


Name	Symbol	Wert		Potenz
Giga	G	1'000'000'000	Milliarde	10 ⁹
Mega	M	1'000'000	Million	10 ⁶
Kilo	k	1'000	Tausend	10 ³
Hekto	h	100	Hundert	10 ²
Deka	da	10	Zehn	10 ¹
Eins	-	1	Eins	10 ⁰
Dezi	d	0,1	Zehntel	10 ⁻¹
Zenti	c	0,01	Hundertstel	10 ⁻²
Milli	m	0,001	Tausendstel	10 ⁻³
Mikro	µ	0,000'001	Millionstel	10 ⁻⁶
Nano	n	0,000'000'001	Milliardstel	10 ⁻⁹

Einige Begriffe

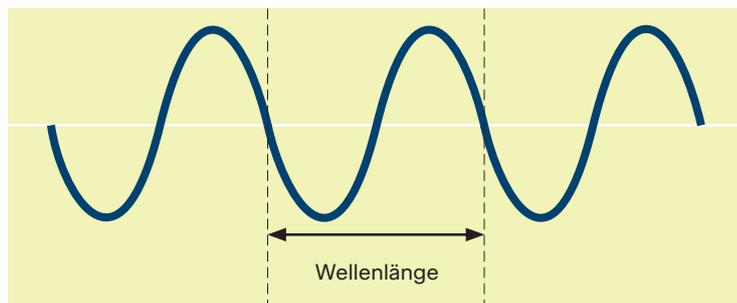
Frequenz [f]

Die Frequenz, gemessen in Hertz [Hz] = [1/s], gibt an, wie viele Wellen pro Sekunde einen Punkt passieren. Wenn das zum Beispiel zehn Wellen pro Sekunde sind, beträgt die Frequenz 10 Hertz.



Wellenlänge [λ]

Die Wellenlänge, gemessen in Meter [m], gibt an, wie lang eine Welle ist. Gemessen wird jeweils eine ganze Welle bestehend aus Wellenberg und Wellental.



Schallgeschwindigkeit [v]

Die Schallgeschwindigkeit, gemessen in Meter pro Sekunde [m/s], gibt an, wie schnell sich eine Welle fortbewegt.

→ Diese 3 Größen sind voneinander abhängig. Wenn wir z.B. die Schallgeschwindigkeit konstant halten und die Frequenz erhöhen, verringert sich die Wellenlänge.

$$\text{Schallgeschwindigkeit} = \text{Wellenlänge} \times \text{Frequenz}$$
$$v = \lambda \times f$$

Im iLab wird mit einer Schall-Frequenz von 17000 Hertz gearbeitet. Nachdem du die Schallgeschwindigkeit in Luft gemessen hast, kannst du die Wellenlänge unseres Schalls bestimmen!

Paul Scherrer Institut PSI

Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
Schweiz
www.psi.ch

PSI iLab

+41 56 310 55 40
ilab@psi.ch
[www.psi.ch/de/visit/
angebot-fuer-schulen](http://www.psi.ch/de/visit/angebot-fuer-schulen)