

3. Akustik

3.1 Unterschiedliche Schallarten im Hörbereich und Ultraschallbereich

Grundlagen der Akustik

In der Akustik wird versucht, die mannigfaltigen Erscheinungen und das Verhalten des Schalls, seine Entstehung, Ausbreitung und Anwendung zu verstehen.

Die Schallerzeugung ist mit mechanischen Schwingungen (z. B. einer Stimmgabel) verbunden, die auf die Luft oder andere Gase, aber auch auf Flüssigkeiten oder feste Körper übertragen werden und so unser Ohr erregen.

Versuche:

V 1: Der Ton einer Klingel unter einer "Käseglocke" ist nicht zu hören, wenn diese evakuiert ist.

V 2: Der Klang einer angestoßenen Stimmgabel wird erst dann deutlich hörbar, wenn sie auf einen Resonanzkörper (vgl. später) aufgelegt wird und diesen zum Mitschwingen anregt.

Nicht immer müssen feste Körper schwingen, um Schall zu erzeugen.

V 3: Sirenen nutzen die periodische Unterbrechung eines Luftstroms zur Schallerzeugung.

Die Tonhöhe wird durch die Zahl der Schwingungen je Sekunde (Frequenz) bestimmt.

V 1: Ein elastischer Streifen aus Federstahlband wird an einem Ende eingespannt und am anderen angestoßen. Je kürzer das freie Ende ist, desto größer ist die Schwingungsfrequenz und desto höher der erzeugte Ton.

Die untere Hörgrenze liegt bei etwa 16 Hz (Hertz) (= 16 Schwingungen pro Sekunde), die obere Hörgrenze schwankt zwischen 10 kHz und 20 kHz. Manche Tiere (Hunde, Katzen, Fledermäuse, Delphine) haben deutliche höhere obere Hörgrenzen (bis 100 kHz bei Delphinen). Das Frequenzgebiet oberhalb von 20 kHz wird als Ultraschall, das Gebiet unterhalb von 16 Hz als Infraschall bezeichnet.

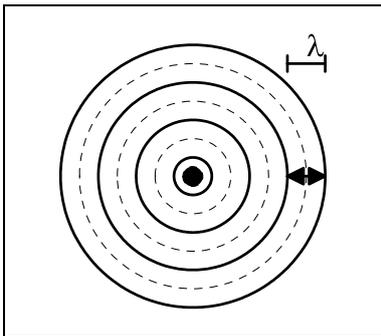
Je nach der Zusammensetzung der Schwingungen bezeichnet man den Schall als Ton (reine Sinusschwingung), Klang (Musikinstrumente), Geräusch oder Knall.

Schallerreger machen schnelle Schwingbewegungen, periodische Hin- und Herbewegungen. Eine Periode der Bewegung umfasst einen Hin- und Rückgang. Die Frequenz gibt die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde an.

Schallausbreitung, Schallgeschwindigkeit

Schallschwingungen breiten sich in Form von Longitudinalwellen aus. Dabei schwingen die Teilchen in der Ausbreitungsrichtung hin und zurück. Wo sie in der Ausbreitungsrichtung schwingen, herrscht Überdruck, wo sie gegen die Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, besteht Unterdruck.

Schallwellen breiten sich bei hinreichen punktförmigen Schallwellen in Form von Kugelwellen um den Schallerreger aus.



Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Dichtemaxima heißt Wellenlänge λ . Eine sich mit der Geschwindigkeit c ausbreitende Welle legt während einer Schwingung ($T = 1/f$) gerade eine Wellenlänge zurück. Dann gilt:

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

Der Schall breitet sich, wie alltägliche Versuche (Beobachten eines entfernten Holzhackers) zeigen, mit der endlichen Geschwindigkeit $c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus (andere Ausbreitungsgeschwindigkeiten: $c_{\text{Eisen}} = 5800 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $c_{\text{Wasser}} = 1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

Der Schall breitet sich in Form von Longitudinalwellen aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt in Luft $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ultraschall

Der Frequenzbereich über 20 kHz wird als Ultraschallbereich bezeichnet. Die Gebrüder Jacques und Pierre Curie entdeckten 1880 den piezoelektrischen Effekt: Bei Kristallen wie Quarz, Zinkblende u. a. tritt durch mechanischen Druck zwischen gegenüberliegenden Grenzflächen eine elektrische Spannung entsteht. Der Effekt ist auch umkehrbar (piezoelektrischer Schallsender).

Technisch wichtig ist auch der umgekehrte Effekt (Elektrostriktion): Durch ein elektrisches Feld wird der Piezokristall mechanisch deformiert. Ein elektrisches Wechselfeld regt ihn zu mechanischen Schwingungen an, die im Resonanzfall recht energiereich sein können. Die Frequenzen liegen im allgemeinen im Ultraschallbereich. Dieser Effekt findet Anwendung bei Bau von Ultraschallgeneratoren, z. B. für medizinische Zwecke.

Trifft Ultraschall auf ein Hindernis, so wird er je nach Größe und Beschaffenheit des Hindernisses zurückgeworfen und kann zur Registrierung und Beschreibung des Hindernisses dienen (Ultraschalluntersuchungen).

Anmerkungen:

1. Bei konstanter Temperatur ist die Eigenfrequenz von Quarz (Schwingquarz) nahezu konstant. Er eignet sich daher zur Steuerung von Uhren.
2. Untersuchungen mit Ultraschall sind absolut ungefährlich und schonend, da dabei keinerlei ionisierende Strahlung verwendet wird.
3. Ultraschall hat eine stark dispergierende Wirkung: an sich nicht mischbare Flüssigkeiten wie Wasser und Benzol lassen sich bei Beschallung mit Ultraschall teilweise mischen.
4. Flüssigkeiten wie z. B. Metall- oder Glasschmelzen lassen sich durch Ultraschall leicht entgasen.
5. Ultraschall zeigt biologische Wirkungen bei der Vernichtung von Einzellern (Sterilisierung der Milch durch Beschallen); auch werden kleine Tiere getötet und Teilchen zerstört (Nierensteinertrümmerer).

2.2 Reflexion, Resonanz und Dopplereffekt als Grundlage der Sonographie

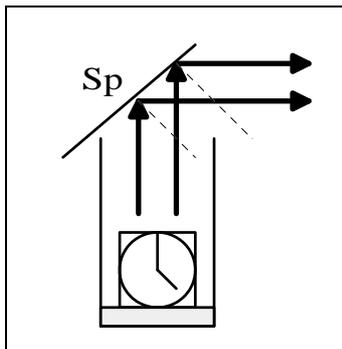
Ultraschall eignet sich aufgrund verschiedener Eigenschaften von Schallwellen und besonders wegen seiner vergleichsweise kleinen Wellenlänge besonders gut für medizinische Zwecke und Apparaturen.

Reflexion von Schallwellen

V 1: Schallwellen werden an Mauern, Felswänden oder Waldrändern reflektiert (zurückgeworfen). Diese Erscheinung wird als Echo bezeichnet. Aus der Zeit bis zur Rückkehr des Echos lässt sich die Entfernung bis zum Hindernis berechnen.

V 2: Eine tickende Uhr liegt auf Watte in einem Standzylinder.

E.: Man hört das Ticken nur dann gut, wenn man die Uhr über den schräg über die Zylinderöffnung gehaltenen Spiegel auch sehen kann.



Die Reflexion von Schall gehorcht denselben Gesetzen wie die Reflexion von Licht (Einfallswinkel = Reflexionswinkel).

Anwendungen:

1. Der Nachhall entsteht, wenn sich die Laufzeiten des direkt ankommenden und des reflektierten Schalls merklich unterscheiden. Abhilfe: Schalldackel von Kanzeln, schalldämmende Materialien (Neuschnee!), schwimmende Estriche, schwere Decken.
2. Bei Versuchen zur Reflexion von Schallwellen an Hindernissen erkennt man, dass eine deutliche Reflexion der Wellen am Hindernis nur dann stattfindet, wenn die Wellenlänge klein im Verhältnis zu den Ausmaßen des Hindernisses ist. Ist die Wellenlänge der Schallwellen von der Größenordnung des Hindernisses oder größer, dann wird die Schallausbreitung durch das Hindernis wenig oder gar nicht beeinflusst. Die Wellen werden dann um das Hindernis herum gebrochen. Bei medizinischen Untersuchungen mit Hilfe von Geräten, die auf der Reflexion von Schallwellen beruhen, muss die Wellenlänge also klein

sein im Vergleich zu den zu untersuchenden Organen. Der Kammer-
ton a ($f = 440 \text{ Hz}$) zum Beispiel hat aber eine Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{440 \text{ Hz}} = 77 \text{ cm},$$

ist also im Gegensatz zu Ultraschall ($\lambda \ll 2 \text{ cm}$) für medizinische
Untersuchungen denkbar ungeeignet.

Resonanz

V 1: Ein Drehpendel wird aus der Ruhelage ausgeleckt und dann losgelas-
sen.

E.: Das Pendel schwingt unabhängig von der Größe der Auslenkung mit
einer bestimmte Frequenz, der sog. Eigenfrequenz.

V 2.: Das Pendel wird durch eine äußere periodische Kraft angeregt.

E.: Das Pendel führt schwingungsfähige Systeme sog. erzwungene Schwin-
gungen aus, d. h. nach einer gewissen Einschwinget schwingt das Pendel
mit der Erregerfrequenz.

V 3: Eigenfrequenz des Pendels und Anregungsfrequenz stimmen überein.

E.: Die Amplitude des Pendels ist maximal (Resonanz), das Pendel hinkt der
Erregerschwingung um eine Viertelperiode hinterher.

V 4: Zwei gleiche Stimmgabeln mit Resonanzkästen stehen einander gegen-
über. Wird die eine angestoßen und dann zum Verstummen gebracht,
schwingt die andere weiter (Resonanz).

V 5: Die zweite Stimmgabel ist gegenüber der ersten verstimmt.

E.: Es ist keine Resonanz zu beobachten.

V6: Zwei geringfügig gegeneinander verstimmte Stimmgabeln werden
angeschlagen.

E.: Es ist ein auf- und abschwelliger Ton zu hören (Schwebung).

Wird ein schwingungsfähiges System mit seiner Eigenfrequenz
periodisch angeregt, dann tritt Resonanz ein, d. h. seine Amplitude wird
maximal.

Anmerkungen:

1. Ultraschallgeneratoren schwingen im Resonanzfall besonders kräftig.
2. Autoteile können bei bestimmten Drehzahlen von Motor oder Reifen
besonders stark mitschwingen.
3. Schall regt das Innenohr, Licht den Sehfarbstoff zum Mitschwingen
an. Ohne Resonanz gäbe es keine Sprache und keine Musik
(Resonanzkasten).

Doppler-Effekt

V.: Eine Schallquelle (Auto, Signalhorn) bewegt sich auf einen Beobachter zu und fährt schnell an ihm vorbei.

E.: Beim Passieren des Beobachters sinkt die Tonlage des Geräuschs deutlich ab (Doppler-Effekt). Dasselbe lässt sich bei Annäherung des Beobachters an eine ruhende Schallquelle beobachten.

Besonders einfach lässt sich der Doppler-Effekt bei Annäherung des Beobachters an die ruhende Schallquelle verstehen:

Bewegt sich der Beobachter mit der Geschwindigkeit v auf eine mit der Frequenz f_0 tönende Schallquelle zu, dann läuft er den Wellenfronten (mit dem gegenseitigen Abstand λ) entgegen. Diese haben jetzt relativ zum Beobachter die Geschwindigkeit $v^* = c + v$. Der Beobachter empfängt daher die Frequenz

$$f_{\text{zu}} = \frac{c+v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} = f_0 + \frac{f_0 \cdot v}{f_0 \cdot \lambda} = f_0 + \frac{f_0 \cdot v}{c} = f_0 + f_0 \cdot \frac{v}{c} = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) > f_0 \quad .$$

Entsprechend vernimmt der Beobachter bei Entfernung von der Signalquelle die Frequenz

$$f_{\text{weg}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) < f_0 \quad .$$

Bewegt sich ein Beobachter relativ zu einer Signalquelle, die einen Ton der Frequenz f abstrahlt, so vernimmt er bei Annäherung einen Ton höherer Frequenz, bei Entfernung einen Ton niedrigerer Frequenz.

Anmerkungen:

1. Bei der Bewegung der Quelle relativ zu einem ruhenden Beobachter ergibt sich ein etwas anderer mathematischer Zusammenhang; die Frequenzänderung bleibt aber qualitativ dieselbe.
2. Mit Hilfe des Dopplereffekts lässt sich eine Aussage über die Relativgeschwindigkeit einer Signalquelle (z. B. vorbeifahrendes Auto) machen.

Dieses Dokument wurde mit Win2PDF, erhaeltlich unter <http://www.win2pdf.com/ch>
Die unregistrierte Version von Win2PDF darf nur zu nicht-kommerziellen Zwecken und zur Evaluation eingesetzt werden.