

Akustik

Die **Akustik** ist die Lehre vom Schall.

1 Schall und Druck

1.1 Physikalische Größen

1 Pa = 1 N/m² (Pa = Pascal)

1 bar = 10⁵ Pa = 1000 hPa

1 hPa = 1 mbar

Normaler Luftdruck: ca. 1000 mbar = 1000 hPa

Alte Einheiten (informativ):

mmWS = Millimeter Wassersäule, mWS = Meter Wassersäule, mmHg = mm Quecksilbersäule

1 mmWS = 9,81 Pa

1 mWS = 73,556 mmHg = 73,556 Torr ≈ 0,09678 atm

10 mWS = 1 at = 1 kp/cm² = 98,1 kPa

1 mmHg = 133,2 Pa = 1,33 hPa

USA / Großbritannien:

1 Pa = 0,00014504 psi (angloamerikanisch, pound per square inch)

1 bar = 14,5 psi

1 psi = 6894,8 Pa = 68,948 mbar

1.2 Schalldruck und Physiologie

Physikalisch gesehen ist Schall eine Welle. In ruhenden Gasen und Flüssigkeiten ist Schall immer eine Longitudinalwelle. In Festkörpern gibt es auch Transversalwellen. Sie bewegen Mediumteilchen (z.B. Luftmoleküle) um einen mittleren Zustand und breiten sich mit der Schallgeschwindigkeit c aus. Dabei transportieren sie Schallenergie.

Die Schallgeschwindigkeit hängt u. a. vom Ausbreitungsmedium ab. In Luft beträgt sie 343 m/s bei einer Temperatur von 20° C und in Wasser 1407 m/s bei einer Temperatur von 0°C.

Die Schallwellenlänge λ kann mit der Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c über folgende Beziehung berechnet werden:

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

Meistens sind bei Schallwellen die Schwankungen der Zustandsgrößen Druck und Dichte klein im Verhältnis zu ihren Ruhegrößen. Die Druckschwankungen zufolge des Schalls sind als Wechseldruck dem Ruhedruck überlagert. Im Vergleich zum statischen Luftdruck sind die Werte der Wechseldrücke (Effektivwerte) der akustischen Ereignisse um Größenordnungen niedriger.

Die Gehörschwelle liegt bei $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 0,2 \text{ nbar}$ bei 2 kHz.

Der Schalldruck wird in dB SPL (Sound Pressure Level) angegeben. Der Druck muss quadriert werden, damit ein Leistungsverhältnis entsteht:

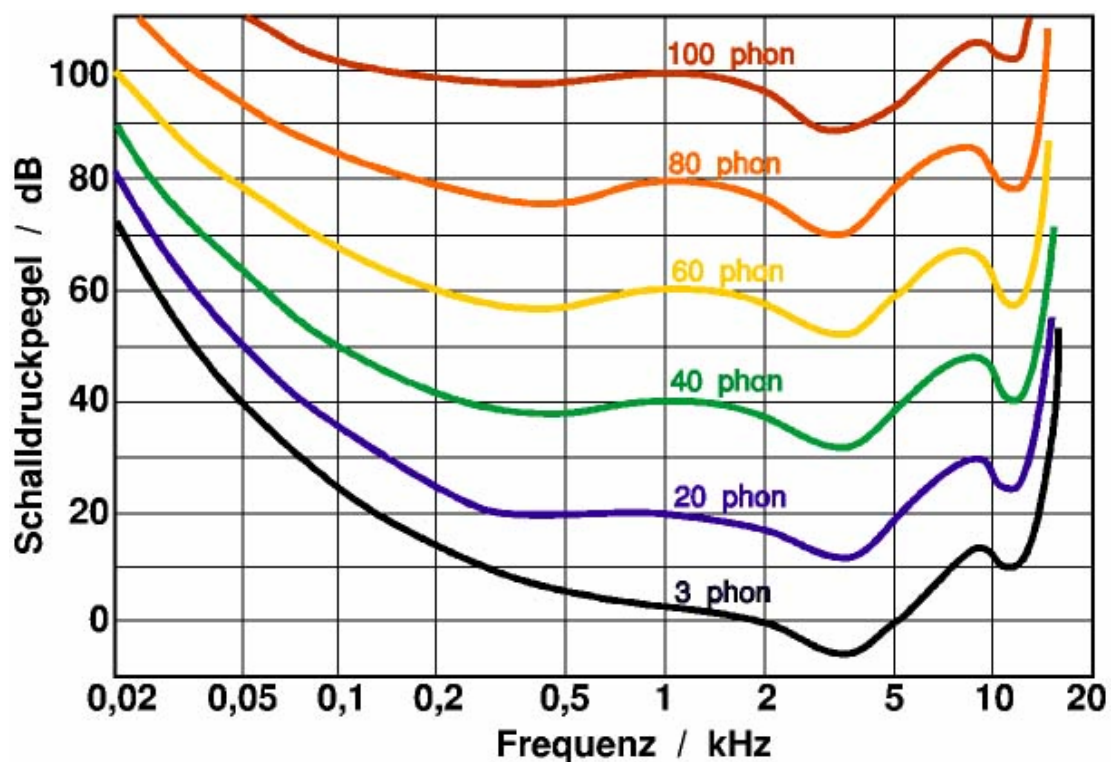
$$L_p = 20 * \lg (p/p_0)$$

Der Schalldruck p ist eine "Schallfeldgröße", die Schallintensität I ist eine "Schallenergiegröße", für die gilt: $I \approx p^2$. Hieraus erkennt man, dass die Schallintensität niemals mit dem Schalldruck gleichgesetzt werden darf. Die Lautstärke wird vom Schalldruck p bestimmt und als Schalldruckpegel L_p in dB SPL ausgedrückt. Mikrofone nehmen den Schalldruck auf.

Der Schalldruck wird als Effektivwert angegeben.

Schallereignis	Schalldruck p in Pa	Schalldruckpegel L_p dB SPL (dB20 μ Pa)
normaler Luftdruck (Statisch)	100 kPa	-
Düsenflugzeug in 30 Meter	630 Pa	150 dB
Gewehrsschuss in 1 m Abstand	200 Pa	140 dB
Schmerzschwelle	100 Pa	134 dB
Gehörschäden bei kurzfristiger Einwirkung	20 Pa	ab 120 dB
Kampfflugzeug 100 m entfernt	6,3 – 200 Pa	110 – 140 dB
Presslufthammer, 1 m entfernt / Diskothek	2 Pa	100 dB
Gehörschäden bei langfristiger Einwirkung	0,63 Pa	ab 90 dB
Hauptverkehrsstraße, 10 m entfernt	0,2 - 0,63 Pa	80 - 90 dB
Pkw, 10 m entfernt	0,02 - 0,2 Pa	60 - 80 dB
Fernseher in Zimmerlautstärke 1 m entfernt	20 mPa	ca. 60 dB
Normale Unterhaltung, 1 m entfernt	2 - 6,3 mPa	40 - 60 dB
Blätterrauschen, ruhiges Atmen	63 μ Pa	10 dB
Hörschwelle bei 2 kHz	20 μ Pa	0 dB

Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs:



Eine Zunahme des Druckes um +20dB entspricht einer Verzehnfachung des physikalischen Schalldruckes. Diese Zunahme wird aber nur als Verdoppelung empfunden (physiologischer Pegel).

Schalldruckpegeldifferenzen und Wahrnehmung:

- $\Delta L_p = 1 \text{ dB}$ wird gerade wahrgenommen
- $\Delta L_p = 3 \text{ dB}$ wird als deutlicher Unterschied wahrgenommen
- $\Delta L_p = 10 \text{ dB}$ wird als doppelt so laut wahrgenommen

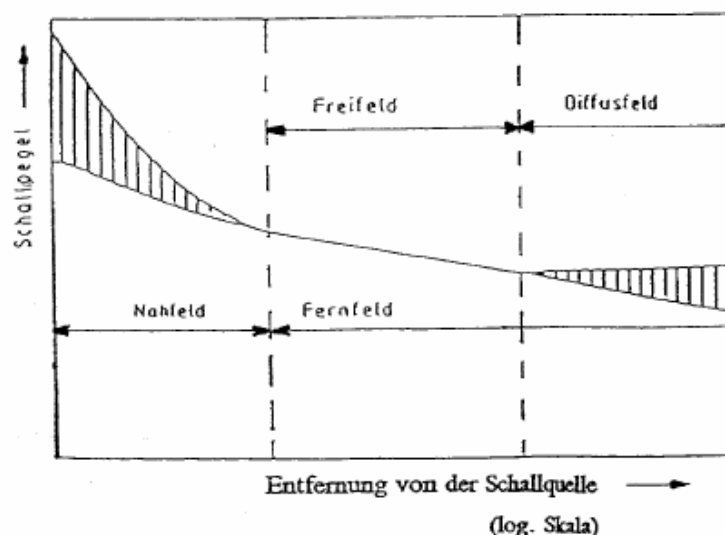
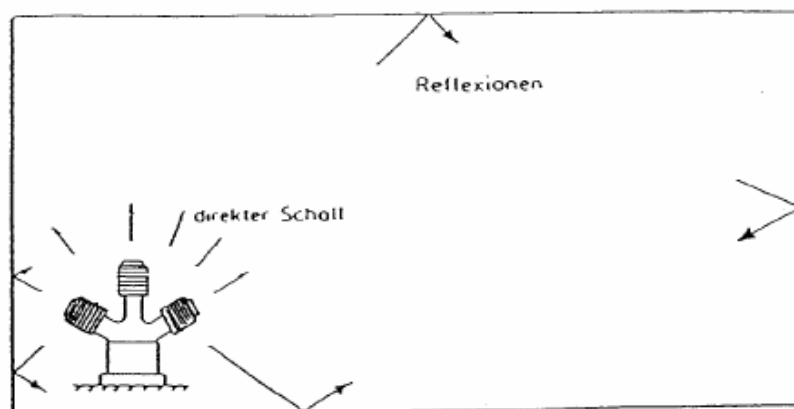
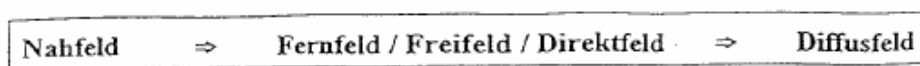
Infraschall: unterhalb 20 Hz, unhörbar, aber bei hoher Intensität fühlbar

Ultraschall: über 20 kHz

Das menschliche Ohr kann etwa 10 Schalleindrücke pro Sekunde deutlich unterscheiden. Reflektierter Schall wird daher bei kurzer Laufzeit ($< 100 \text{ ms}$) als Nachhall, bei langer Laufzeit ($> 100 \text{ ms}$) als Echo empfunden.

Durch die Schallaufnahme mit zwei Ohren ist das Richtungshören möglich. Die räumliche Lokalisation der Schallquelle ist dabei durch die Laufzeit- und Intensitätsunterschiede zwischen rechtem und linkem Ohr möglich. Dabei wird das Richtungshören mit zunehmender Frequenz besser. Tiefe Frequenzen können oft nicht lokalisiert werden. Dieser Effekt wird bei Surround-Verstärkeranlagen ausgenutzt (Stereo, Dolby- Surround).

1.3 Schallausbreitung

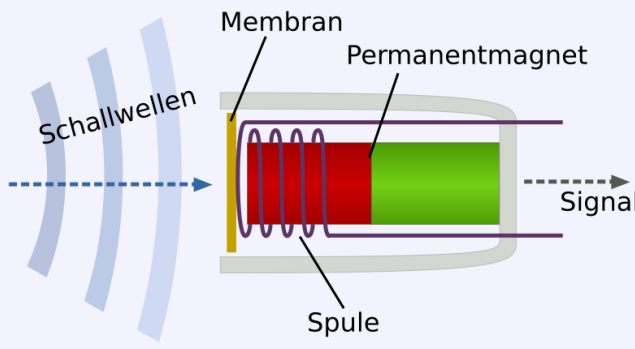
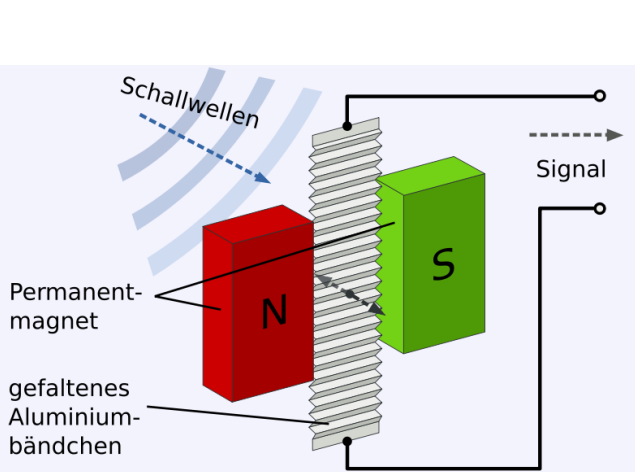
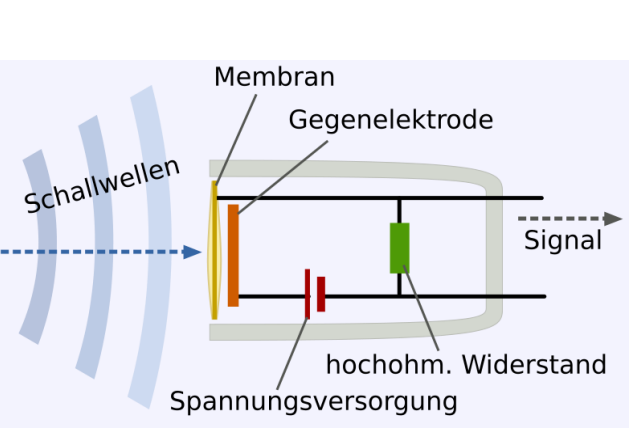


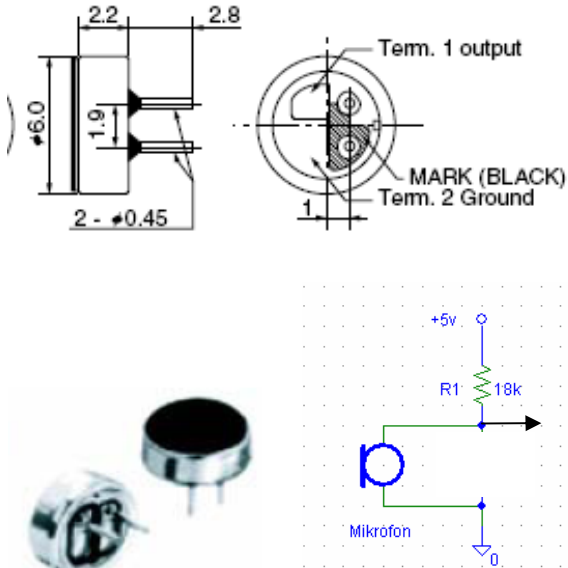
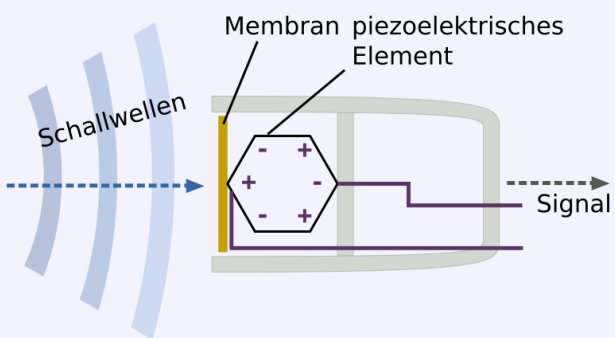
2 Technische Akustik

2.1 Mikrofone

Ein Mikrofon ist ein Sensor, der Schall in elektrische Spannungen wandelt. In der gängigen Bauform folgt eine dünne, elastisch gelagerte Membran den Druckschwankungen des Schalls. Sie bildet durch ihre Bewegung den zeitlichen Verlauf des Wechseldrucks nach. Ein Wandler, der mechanisch oder elektrisch mit der Membran gekoppelt ist, erzeugt daraus eine entsprechende Wechselspannung.

Mikrofontypen

Tauchspulenmikrofon Die ist Membran fest mit einer Magnetspule verbunden, die durch die Membranbewegung in ein statisches dauermagnetisches Feld „eintaucht“. Die relative Bewegung von Spule und Magnetfeld erzeugt durch Induktion die Signalspannung. Tauchspulenmikrofone haben ein träges Einschwingverhalten.	 Das Diagramm zeigt den Aufbau eines Tauchspulenmikrofons. Von links kommen Schallwellen (blau gestrichelt) auf eine Membran (gelb) zu. Die Membran ist mit einer Spule (rot) verbunden, die in einem Permanentmagnet (grün) eintaucht. Ein Signal (gestrichelt) führt von der Spule nach rechts aus dem Gehäuse.
Bändchenmikrofon Die Membran des Bändchenmikrofons ist ein zickzack-gefalteter Aluminiumstreifen von 2 bis 4 mm Breite und ein paar Zentimeter Länge. Der Streifen ist nur wenige Mikrometer dick. Bei Anregung durch eintreffenden Schall induziert die Bewegung im Magnetfeld eine entsprechende Spannung, die an den Enden des Aluminiumstreifens abgegriffen werden kann. Bändchenmikrofone besitzen einen nahezu linearen Frequenzgang; ihre äußerst leichte Membran verleiht ihnen ein gutes Impulsverhalten.	 Das Diagramm zeigt den Aufbau eines Bändchenmikrofons. Von links kommen Schallwellen (blau gestrichelt) auf ein gefaltetes Aluminiumbändchen (grau) zu. Das Bändchen befindet sich zwischen den Nord- (N, rot) und Süd- (S, grün) Polen eines Permanentmagneten. Ein Signal (gestrichelt) führt von den Enden des Bändchens nach rechts aus dem Gehäuse.
Kondensatormikrofon Eine wenige tausendstel Millimeter dicke, elektrisch leitfähige Membran ist dicht vor einer Metallplatte isoliert angebracht. Diese Anordnung entspricht einem Plattenkondensator, der einige pF Kapazität besitzt. Eintreffender Schall bringt die Membran zum Schwingen, wodurch sich der Abstand der beiden Folien und damit auch die Kapazität verändert. Diese Kapazitätsschwankungen führen zu Spannungsschwankungen. Eine DC- Versorgungsspannung von 40 ... 100 V ist erforderlich.	 Das Diagramm zeigt den Aufbau eines Kondensatormikrofons. Von links kommen Schallwellen (blau gestrichelt) auf eine Membran (gelb) zu. Die Membran ist gegenüber einer Gegenelektrode (grün) positioniert. Eine Spannungsvorsorgung (rot) ist angeschlossen, und ein hoher Widerstand (grün) ist in Reihe mit der Gegenelektrode geschaltet. Ein Signal (gestrichelt) führt von der Gegenelektrode nach rechts aus dem Gehäuse.

Elektretmikrofon Die Bauform ist mit dem Kondensatormikrofon eng verwandt. Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich eine Elektretfolie, in der die Vorspannung sozusagen „eingefroren“ ist. Ein Mikrofonverstärker (Impedanzwandler mit MOS-FET) zur Verstärkung des schwachen Signals befindet sich in der Mikrofonkapsel. Die Betriebsspannung beträgt nur einige Volt. Der geringe Strombedarf von ca. 1mA begünstigt den Einsatz in mobilen Geräten. Elektretmikrofone werden wegen ihres geringen Preises, der einfachen Schaltungstechnik und ihrer guten Empfindlichkeit in vielen Anwendungen eingesetzt.	
Piezomikrofon Das Wandlerprinzip beruht auf den Eigenschaften piezoelektrischer Elemente. Eine Membran folgt den Druckschwankungen des Schalls. Sie ist mechanisch mit einem piezoelektrischen Element gekoppelt. Dieses wird durch die Druckschwankungen minimal verformt und gibt diese als elektrische Spannungsschwankungen aus. Sie sind mechanisch robust und einfach gebaut. Ein Nachteil ist der hohe Klirrfaktor.	

2.2 Richtcharakteristik von Mikrofonen

In einem Polardiagramm wird die relative Empfindlichkeit eines Mikrofons eingetragen. Die Form des Polardiagramms gibt Auskunft über die Richtwirkung des Mikrofons. Die Kurven sind meist noch frequenzabhängig. Die Auswahl von Mikrofonen mit einer geeigneten Charakteristik ist vor allem in der Tonstudioteknik und bei Musikaufnahmen wesentlich.

