



# Mehr als Schall und Rauch

## Einführung in die Grundbegriffe der Akustik

Schall besteht seiner Natur nach aus mechanischen Schwingungen in elastischen Medien. Das Auftreten von Schall ist somit an die Existenz von Materie gebunden. Im Vakuum gibt es keinen Schall. Mit anderen Worten: Schall kann in gasförmigen (Luftschall), in flüssigen (Flüssigkeitsschall) und/oder in festen Stoffen (Körperschall) auftreten.

Beginnen wir vorerst mit dem Luftschall, dem Schall im bedeutsamsten gasförmigen Medium, in dem wir uns täglich bewegen. Luftschall kann durch Anregung fester Körper zu Schwingungen entstehen, sofern die Körper mit der umgebenden Luft in Kontakt stehen. Der primär erzeugte Körperschall wird dabei auf die Luft übertragen, d. h. in die Luft abgestrahlt. Es kommt dabei zu Schwankungen der Luftdichte (Überdruck und Unterdruck). Bekannte Schallquellen dieser Art sind beispielsweise Glocken, Stimmgabeln, Musikinstrumente oder auch Lautsprecher.

Während bei Glocken der Schall von den schwingenden Wandungen des Glockenkörpers abgestrahlt wird, erfolgt die Abstrahlung beim Lautsprecher durch eine schwingende Membran, siehe Bild 1. Die

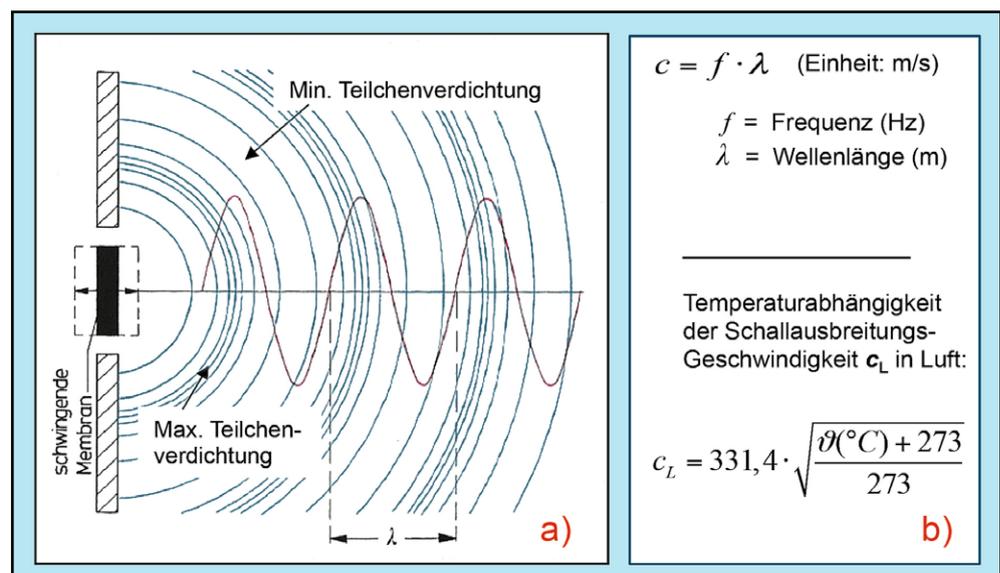


Bild 1: a) Schallerzeugung und -abstrahlung in einen Halbraum mithilfe einer schwingenden Kolbenmembran, z. B. durch einen Lautsprecher. Die blauen Halbkreise stellen (Halb-)Kugelflächen gleicher Phase dar, die sich mit Schallgeschwindigkeit  $c$  im (Halb-)Raum ausbreiten. Bereiche, in denen die blauen Halbkreise sehr eng beieinander liegen, bedeuten eine maximale Teilchenverdichtung und umgekehrt. b) Die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist abhängig von der Temperatur des Ausbreitungsmediums.



## Zur Information:

In leicht verständlicher Form wollen wir in den kommenden Ausgaben eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik** vermitteln.

Diese Themengebiete werden wir beleuchten:

- **Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren**
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler
- Raum- und Bauakustik – sabinesches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Messboxen und Hallräume
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infrarotschall – natürliche und industrielle Quellen

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

dabei auftretenden Teilchenverdichtungen und Teilchenverdünnungen des Mediums pflanzen sich wellenartig fort, wobei die einzelnen Medienteilchen nur um ihre Ruhelage herum schwingen, siehe Bild 2.

Bei einer Anregung mit einem periodischen Signal folgt auf jede Verdichtungswelle in gleichem Abstand  $\lambda$  jeweils eine Verdünnungswelle. Diesen Abstand bezeichnet man auch als Wellenlänge des Schalls. Man hat es hierbei mit periodischen Druckschwankungen zu tun, und zwar um den Wert des vor Ort herrschenden (statischen) Luftdrucks  $p_0$ , den uns auch der Wetterbericht liefert. Als Normaldruck gilt ein Wert von  $101325 \approx 10^5 \text{ N/m}^2$  oder Pa (= Pascal), siehe Bild 3. Im Wetterbericht

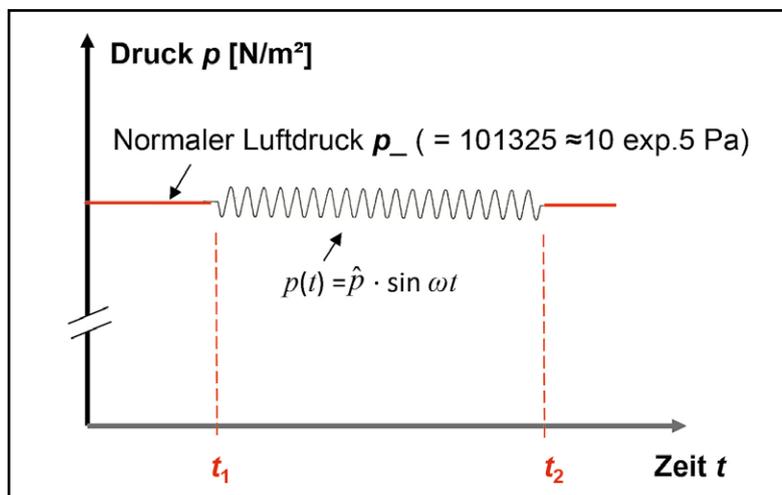


Bild 3: Gegenüberstellung: Luftdruck und Schalldruck. Schaltet man zu einem Zeitpunkt  $t_1$  eine Schallquelle ein und zu einem Zeitpunkt  $t_2$  wieder aus, so überlagert während dieser Zeit ( $t_2 - t_1$ ) der Schall(wechsel)druck  $p(t)$  den statischen Luftdruck  $p_0$ . Interessant ist hier ein Zahlenvergleich. Der Schalldruck, den wir mit unserem Gehör bei 1 kHz gerade noch wahrnehmen können, beträgt  $20 \mu\text{Pa}$ . Das ist ein Zahlenwert, der um rund zehn Zehnerpotenzen kleiner (!) ist als der normale Luftdruck, der uns umgibt.

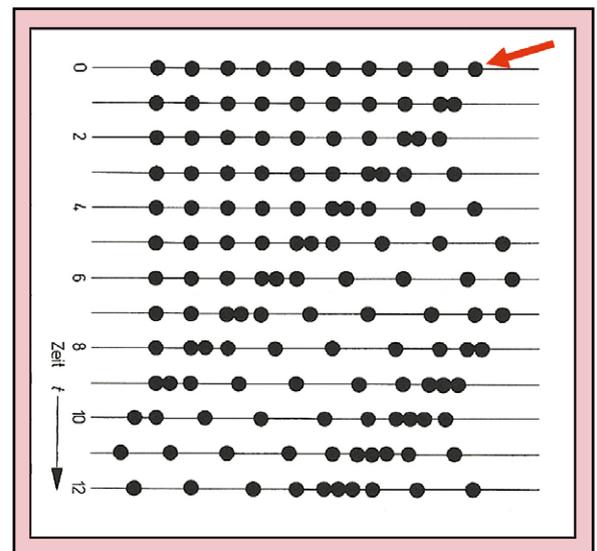


Bild 2: Fortpflanzung einer sinusförmigen Erregung in einer Reihe elastisch gelagerter Masseteilchen; hier bei einer Anregung oben rechts im Bild (roter Pfeil). Die Darstellung zeigt schematisch die Erregung nach verschiedenen Zeitabschnitten  $t$ . Man erkennt hier deutlich, wie es zur Ausbildung von Teilchen-Verdichtungen und Teilchen-Verdünnungen kommt, ähnlich wie bei der Ausbildung eines Schallfelds.

wird häufig auch die Einheit hPa (= Hekto-Pascal) verwendet, z. B. 1013,25 hPa.

Das Produkt aus der Wellenlänge  $\lambda$  [Einheit: m] und der Anregungsfrequenz  $f$  [Einheit: Hz] ergibt die Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  [Einheit: m/s]. Diese Geschwindigkeit ist abhängig von der Temperatur  $\vartheta$  [Einheit: °C] der Umgebung, in der die

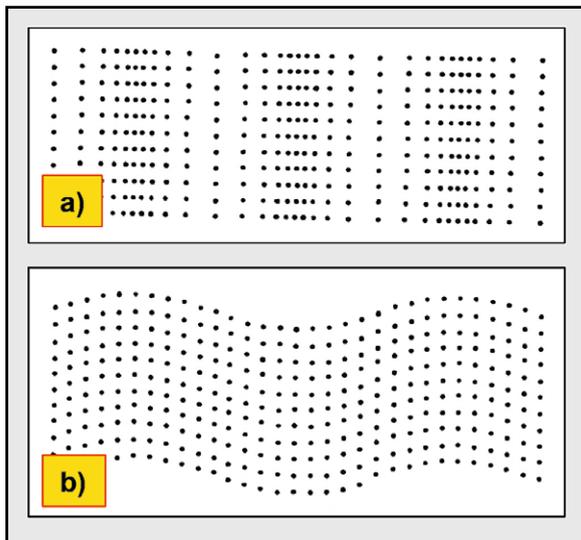


Bild 4: a) Longitudinal- oder auch Längswellen und b) Transversal- oder auch Schubwellen in schematischer Darstellung

Ausbreitung stattfindet. Gemäß der in der Bild 1 b angegebenen Beziehung ergibt sich für eine Umgebungstemperatur von beispielsweise 20 °C ein Wert von  $c_{Luft} = 343,3$  m/s für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls. In der Praxis wird bei Berechnungen im Allgemeinen mit einem Wert von abgerundet 343 m/s gearbeitet.

### Die Grundgrößen der Akustik: Schalldruck und Schallschnelle

Die bei den genannten Druckschwankungen auftretenden Verdichtungen und Verdünnungen des Mediums (Luft) pflanzen sich wellenartig als Schall fort, wobei die einzelnen Mediumteilchen, nämlich die Luftmoleküle, ortsfeste Schwingungen um ihre Ruhelage herum ausführen. Diese Druckschwankungen bezeichnet man als Schallwechseldruck oder – kurz – als **Schalldruck**  $p$  [Einheit: N/m<sup>2</sup> oder Pa]; englisch: *sound pressure*. Die Anzahl der Druckschwankungen bzw. der Schwingungen pro Sekunde ist durch die Anregungsfrequenz  $f$  des Schalls gegeben.



Bild 5: Veranschaulichung von Transversalschwingungen: Wirft man einen Gegenstand ins Wasser, so beobachtet man an der Wasseroberfläche konzentrische Wellen, die sich in radialer Richtung ausbreiten, obwohl die Wassermoleküle orthogonal dazu, d. h. quer zur Wellenausbreitung, schwingen.

Die Wechselgeschwindigkeit, mit der sich die schwingenden Mediumteilchen bzw. Luftmoleküle um ihre Ruhelage herum bewegen, bezeichnet man als Schallschnelle  $v$  [Einheit: m/s]; englisch: *sound particle velocity*. Beide Größen, der Schalldruck  $p$  und die Schallschnelle  $v$ , bilden die beiden Grundgrößen der Akustik. Mit ihnen kann jeder Schallvorgang genauso vollständig beschrieben werden, wie das in der Elektrotechnik mit der elektrischen Spannung  $U$  und dem elektrischen Strom  $I$  möglich ist. Der grundsätzliche Unterschied zwischen diesen Größen besteht darin, dass die beiden Grundgrößen der Elektrotechnik skalare, also ungerichtete Größen sind, während in der Akustik lediglich der Schalldruck  $p$  eine skalare Größe ist, die Schallschnelle  $v$  aber eine vektorielle, d. h. gerichtete, Größe ist.

Korrekterweise müsste man das Symbol für die Schallschnelle stets mit einem Vektorzeichen  $\vec{v}$  versehen. Mit diesen beiden Größen, dem Schalldruck  $p$  und der Schallschnelle  $v$ , kann jedes Schallfeld eindeutig beschrieben werden.

Schall breitet sich, wie schon erwähnt, wellenartig aus. In Gasen und in Flüssigkeiten erfolgt diese Ausbreitung nur in Form von Längs- oder Longitudinalwellen, siehe Bild 4 a. Die Teilchen bewegen sich dabei in radialer Richtung bezogen auf die Schallquelle. In festen Körpern können neben Longitudinalwellen auch noch andere Wellenarten auftreten, z. B. Transversal- oder Schubwellen (Bild 4 b), Oberflächenwellen, Torsionswellen oder auch Biegewellen. Mehr darüber später. Bei Transversalwellen schwingen die Mediumteilchen quer zur Wellenausbreitung, die Energieübertragung dagegen erfolgt orthogonal dazu, d. h. in radialer Richtung, bezogen auf die Quelle. Dieser Zusammenhang erschließt sich dem Leser nicht sofort. Bild 5 versucht das anhand eines Beispiels auf der Wasseroberfläche zu veranschaulichen.

Kehren wir noch einmal zurück zum Vergleich mit der Elektrotechnik. Mit den beiden Größen Strom ( $I$ ) und Spannung ( $U$ ) kann man jeden elektrischen Vorgang eindeutig beschreiben. Aus dem Produkt von Spannung und Strom erhält man bekanntlich die elektrische Leistung ( $P$ ), und aus dem Quotienten von Spannung und Strom bekommt man einen Widerstand ( $R$ ) oder – ganz allgemein – eine Impedanz.

Ähnlich liegen die Verhältnisse auch in der Akustik. Das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle ergibt zwar nicht direkt eine Leistung, wohl aber eine leistungsproportionale Größe, nämlich die Schallleistungsdichte oder Schallintensität  $I$  [Einheit: W/m<sup>2</sup>], d. h. die Schallleistung pro Flächeneinheit, siehe Bild 6.

Die Schallleistung  $P_{ak}$  [Einheit: W] erhält man durch Multiplikation der Schallintensität  $I$  mit der durchschallten Fläche  $S$  [Einheit: m<sup>2</sup>].

Das **Produkt** aus Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  ergibt eine leistungsbezogene Größe, die Schallintensität  $I$ .

$$p \cdot v = I = P_{ak} / S \quad (\text{Einheit: W/m}^2)$$

Wobei  $P_{ak}$  die Schallleistung (Einheit: W) und  $S$  (Einheit: m<sup>2</sup>) die durchschallte Fläche bedeuten.

a)

Der **Quotient** aus Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  ergibt einen Widerstand, bzw. eine Impedanz, die im ebenen Schallfeld eine Naturkonstante ( $Z_o = \rho \cdot c$ ) ist.

$$p / v = Z_s = \dots Z_o = 408 \text{ Ns/m}^2 \quad (\text{im ebenen Feld})$$

b)

Bild 6: Analogien: Zwischen den beiden Schallfeldgrößen  $p$  und  $v$  bestehen bemerkenswerte Analogien zur Elektrotechnik und deren beiden Grundgrößen Spannung und Strom sowie den damit im Zusammenhang stehenden Begriffen Leistung und Impedanz.

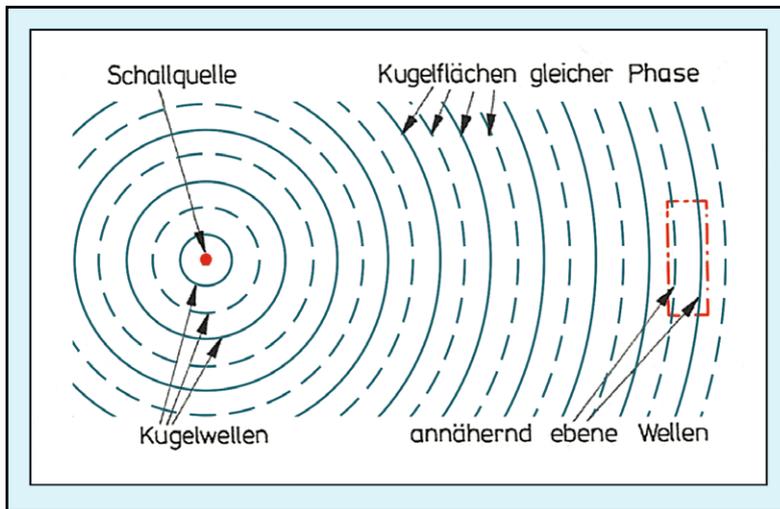


Bild 7: Kugelschallwellen und ebene Schallwellen. In der Nähe einer punktförmigen Schallquelle besteht das Schallfeld aus kugelförmigen Schallwellen, während man in größerer Entfernung von der Quelle ebene Schallwellen antrifft. Das Kugelschallfeld unterteilt sich ferner noch in ein Nah- und in ein Fernfeld. Für alle drei Schallfeldformen gelten unterschiedliche Ausbreitungsgesetze.

Leistungen werden in der Technik im Allgemeinen mit dem Symbol  $P$  für Power bezeichnet. Nun wird aber für den Schalldruck das Symbol  $p$  verwendet, was bei flüchtiger Schreibweise zu Verwechslungen führen kann. Aus diesem Grund nimmt man zur zweifelsfreien Bezeichnung der Schalleistung gelegentlich auch das Symbol  $W_{ak}$ . Auch für die Bezeichnung des Schalleistungspegels verwendet man den Buchstaben  $W$  im Index:  $L_W$ .

Der Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle ergibt unterschiedliche, schallfeldspezifische Impedanzen. Während man in der Elektrotechnik nur einen Impedanzbegriff kennt, nämlich mit der Einheit Ohm  $[\Omega]$ , gibt es in der Akustik einschließlich der Schwingungstechnik mehrere Impedanzen mit insgesamt vier verschiedenen Einheiten, nämlich:  $\text{Ns/m}$ ,  $\text{Ns/m}^3$ ,  $\text{Ns/m}^4$  und  $\text{Ns/m}^5$ . Mehr dazu in späteren Beiträgen.

### Formen von Schallfeldern

Blieben wir vorerst beim Quotienten aus dem Schalldruck und der Schallschnelle. Man erhält aus ihm die spezifische Schallimpedanz  $Z_s$  [Einheit:  $\text{Ns/m}^3$ ], die im kugelförmigen Teil des Schallfelds komplex ist, mit Realteil und Imaginärteil, während sie in größerer Entfernung  $r$  von der Schallquelle, nämlich im ebenen Teil des Schallfelds, d. h. im ebenen Schallfeld (siehe auch Bild 7), reell wird. Mehr noch, dort bildet sie als Produkt aus Luftdichte  $p$  und Schallgeschwindigkeit  $c$  quasi eine Naturkonstante mit einem Wert von  $Z_o = 408 \text{ Ns/m}^3$  (bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Aus der zunächst komplexen Impedanz  $Z_s$  wird im ebenen Feld die sogenannte Schallkennimpedanz  $Z_o = p \cdot c$  (früher auch: Wellenwiderstand des freien Raums). Dem Wert von  $408 \text{ Ns/m}^3$  begegnet man bei sehr vielen akustischen Berechnungen in der Praxis.

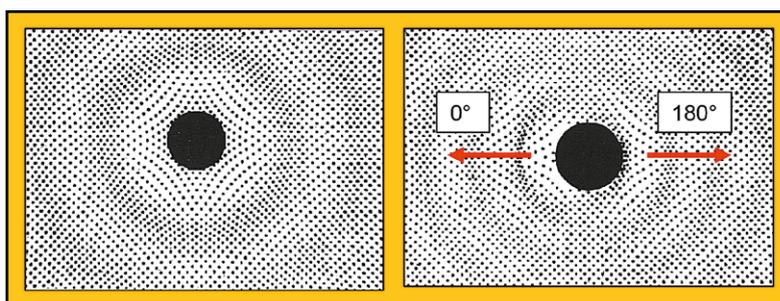


Bild 8: Schallfeld einer a) „atmenden“ Kugel (= Kugelstrahler 0. Ordnung; Monopol) und einer b) „oszillierenden“ Kugel (= Kugelstrahler 1. Ordnung; Dipolstrahler)

Bild 7 wurde eben schon genannt. Dort ist eine punktförmige Schallquelle dargestellt, von der aus kugelförmige Schallwellen oder – kurz – Kugelschallwellen ohne jede Richtwirkung abgestrahlt werden. Quellen dieser Art nennt man auch Kugelstrahler 0. Ordnung oder „Monopole“ (Bild 8), was bereits impliziert, dass es auch Schallquellen höherer Ordnung gibt. In der Nähe der Schallquelle besteht das Schallfeld aus Kugelschallwellen, während man mit zunehmender Entfernung schließlich ein ebenes Schallfeld erreicht. Das Kugelschallfeld seinerseits gliedert sich in ein Nahfeld und in ein Fernfeld. In allen drei Bereichen des Schallfelds gelten unterschiedliche Ausbreitungsgesetze. Das wichtigste Kennzeichen des ebenen Schallfelds besteht darin, dass dort die beiden Feldgrößen Schalldruck und Schallschnelle die gleiche Phase haben, d. h., dort besteht der abgestrahlte Schall aus Wirkleistung. Mit kürzer werdendem Abstand zur Quelle wird der Wirkleistungsanteil geringer und der Anteil an Blindleistung nimmt zu.

Punktförmige Schallquellen, d. h. Kugelstrahler 0. Ordnung, strahlen Schall ungerichtet nach allen Seiten gleichmäßig ab. Daneben gibt es aber auch Strahler höherer Ordnung, beispielsweise Kugelstrahler 1. Ordnung oder „Dipole“, die eine sehr ausgeprägte Richtwirkung haben, die wie die Zahl Acht aussieht. Bei Mikrofonen spricht man daher auch von einer Achtercharakteristik. Schallquellen dieser Art zeichnen sich durch eine maximale Abstrahlung in zwei entgegengesetzte Richtungen aus ( $0^\circ$  und  $180^\circ$ ), siehe Bild 8 b. In der Querrichtung erfolgt (theoretisch) keine Schallabstrahlung. Durch eine geeignete Anordnung einer größeren Zahl von Schallstrahlern lassen sich beliebig viele, verschiedene Richtwirkungen realisieren.

### Pegel und Schallfelder

Eine weitere sehr wichtige Größe, mit der man in der Akustik arbeitet, sind Pegel. Das sind logarithmierte Verhältnisgrößen von verschiedenen physikalisch-technischen Größen, z. B. von Schalldrücken, von Schalleistungen etc. Auch in der Elektrotechnik kennt man Pegel, und zwar von diversen elektrischen Größen. Für die Akustik haben Pegel eine ganz besondere Bedeutung, nämlich dass unser Gehör Schalleignisse nach einer quasilogarithmischen Skala bewertet.

Ein in der Akustik sehr häufig verwendeter Pegel ist der Schalldruckpegel  $L_p = 20 \cdot \lg p/p_o$  (Einheit: dB), der als Logarithmus des Verhältnisses irgendeines Schalldrucks  $p$  zu einem ganz bestimmten Bezugsschalldruck  $p_o$  definiert ist, siehe Bild 9. Diese Bezugsgröße hat einen international festgelegten Wert, und zwar  $p_o = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ . Dieser Wert entspricht der menschlichen Hörschwelle bei  $1 \text{ kHz}$ . Das ist der kleinste Schalldruck, den unser Gehör bei  $1 \text{ kHz}$  gerade noch wahrnehmen kann. Bei den zur Pegelbildung verwendeten Schalldrücken handelt es sich stets um Effektivwerte!

Bei Schallfeldern unterscheidet man grundsätzlich zwischen freien und diffusen Schallfeldern. In diesem ersten Beitrag sollen zunächst nur freie Schallfelder betrachtet werden, d. h. Felder, in denen sich

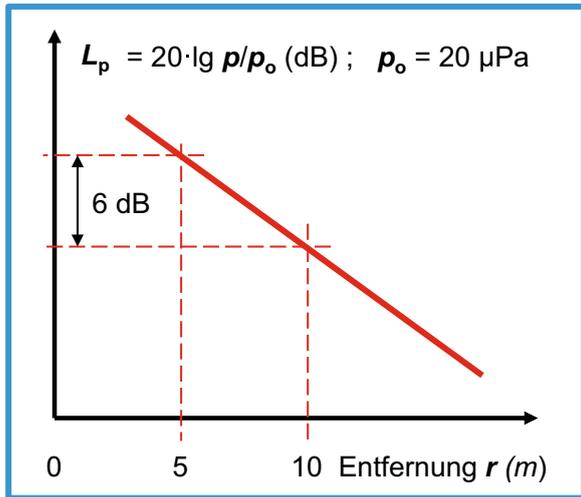


Bild 9: Abfall des Schalldruckpegels  $L_p$  im freien Schallfeld. Bei einer Verdopplung des Abstands zur Schallquelle nimmt der Pegel um  $-6$  dB ab. Würde man anstelle des Druckpegels den Schalldruck  $p$  auftragen, so verlief der Abfall nach einer Exponentialfunktion. Durch die Darstellung als logarithmische Pegelgröße wird daraus eine Gerade. Die Bezugsgröße  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  für die Bildung des Schalldruckpegels ist identisch mit der menschlichen Hörschwelle bei 1 kHz.

Schall, ohne irgendwo reflektiert zu werden, ausbreiten kann. Für diesen Fall gilt, dass sich bei einer Verdopplung des Abstands  $r$  zur Schallquelle der Schalldruck  $p$  ( $\sim 1/r$ ) halbiert und der Schalldruckpegel um  $-6$  dB abnimmt. Die Schalleistung  $P_{ak}$  (Bild 6) dagegen ist eine reine Kenngröße der Schallquelle und somit unabhängig von der Entfernung  $r$ . Dazu ein anschaulicher Vergleich: Eine elektrische Lichtquelle nimmt eine ganz bestimmte, konstante Leistung vom Netz auf, und zwar unabhängig von der Entfernung zum Betrachter. Genauso verhält es sich auch mit der akustischen Leistung, die eine Schallquelle abstrahlt.

Bild 9 zeigt die Abhängigkeit des Schalldruckpegels  $L_p$  noch einmal anhand eines Diagramms. Im freien Feld nimmt der Schalldruck  $p$  mit zunehmender Entfernung  $r$  von der Quelle nach einer Exponentialfunktion ab. Durch die Logarithmierung wird daraus bei der Pegelbildung aber eine Gerade, und bei einer Verdopplung der Entfernung  $r$  verringert sich der Pegel somit um  $-6$  dB.

## Akustische Resonatoren für die Entwicklung von Mikrofonen

Abschließend noch ein letztes Thema, das später bei der Behandlung der elektroakustischen Wandler eine wichtige Verständnisgrundlage darstellt: Resonatoren. Elektrische Schwingkreise kennt man in der Elektrotechnik, schwingfähige Masse-Feder-Systeme gibt es in der Mechanik, und akustische Resonatoren sind sehr hilfreich bei der Entwicklung von Schallwandlern, insbesondere von Mikrofonen. Bild 10 zeigt ein einfaches, durch einen Reibungswiderstand  $r$  [Ns/m] gedämpftes Masse-Feder-System. Die Dämpfung erfolgt hier durch Reibungsverluste, die die in Schwingungen versetzte Masse  $m$  in einem wassergefüllten Behälter erfährt. Im nicht gedämpften Fall hängt die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  des Systems ausschließlich vom Produkt der Masse  $m$  und der Federnachgiebigkeit  $n$  ab.

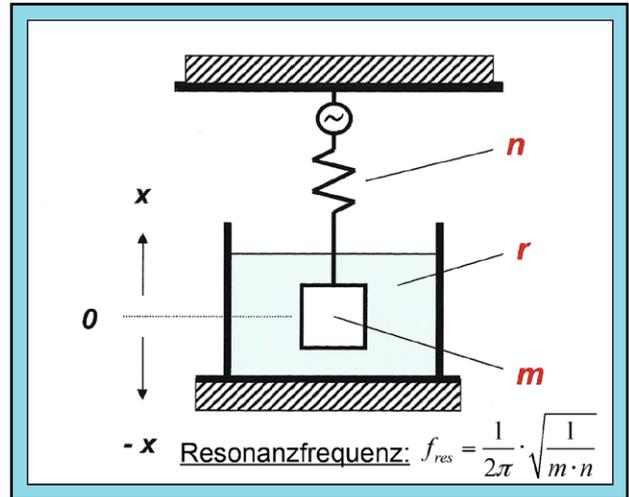


Bild 10: Mechanisches Schwingungsgebilde (Schwingkreis), bestehend aus einer Masse  $m$  [kg], einer Nachgiebigkeit  $n$  [m/N] und einem Dämpfungswiderstand  $r$  [Ns/m]. Ohne Reibungsverluste errechnet sich die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  eines solchen Gebildes nach der obigen Formel, vgl. dazu auch die Thomsonsche Formel für elektrische Schwingkreise.

Kommt eine Dämpfung hinzu, so sinkt die Resonanzfrequenz je nach verbleibender Güte oder Resonanzschärfe  $\rho$  (auch Q-Faktor). Das gleiche Verhalten zeigen auch Masse-Feder-Systeme, die aus „unsichtbaren Massen“ und „unsichtbaren Federn“ bestehen, wie das z. B. beim Helmholtz-Resonator der Fall ist (Bild 11). Derartige Gebilde findet man in nahezu jedem Studiomikrofon. Darüber wird noch in einem späteren Beitrag ausführlich berichtet. Die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Resonators ist hauptsächlich abhängig von den Abmessungen (Durchmesser und Länge) des Resonatorhalses und vom Volumen des Resonatorhohlraums.

Der Resonator besteht im Prinzip aus einem schallhart berandeten Hohlraum mit einem Volumen  $V$ , das wie eine „unsichtbare“ Hohlraumfeder wirkt, und des Weiteren aus einem Hals- oder Rohransatz, der am Hohlraum beginnt und nach außen offen ist. Sind die Abmessungen des Resonatorhalses klein im Vergleich zur Wellenlänge  $\lambda$  ( $= c/f_{res}$ ) der Resonanzfrequenz, so schwingt die darin eingeschlossene Luft bei einer Anregung unkomprimiert hin und her wie eine „unsichtbare“ Hohlraummasse. Eine leere Flasche z. B. bildet so einen Helmholtz'schen Hohlraumresonator, der beim Anblasen in seiner Resonanzfrequenz schwingt und einen Ton erzeugt.

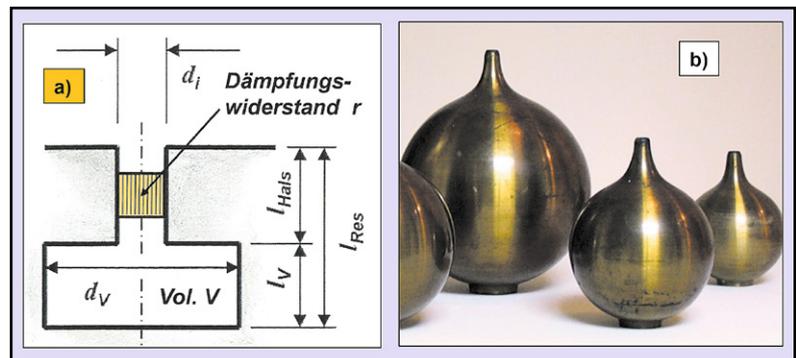


Bild 11: Helmholtz'scher Hohlraumresonator

a) Prinzipdarstellung

b) Praktische Ausführung von Resonatoren, wie sie Hermann von Helmholtz um 1859 für seine Klanganalysen verwendete. Anfangs bestanden die Resonatoren aus Glas, später aus Messingblech. Die spitze Öffnung hielt er sich dabei ans Ohr, um den Grundton eines Klanggemischs zu bestimmen, das von der unteren Resonatoröffnung aufgenommen wurde.



## Hohlraum-Resonatoren gegen Lärm

Hohlraum-Resonatoren finden beispielsweise Einsatz in Kfz-Abgasschalldämpfern, deren Aufgabe darin besteht, die Wechselströmung (= Lärm), die die Auspuffgase transportiert, möglichst stark zu dämpfen, während die Gleichströmung der Abgase den Dämpfer weitgehend ungehindert passiert.

Eine andere Verwendung finden Helmholtz-Resonatoren in Bassreflex-Lautsprecherboxen zur Erweiterung des Übertragungsbereichs in Richtung tiefe Frequenzen. Während bei den bekannten Ausführungen derartiger Resonatoren der Resonatorhals nach außen ragt, schaut das Resonatorrohr bei Bassreflex-Lautsprechern in die Box hinein.

Mit ganzen Batterien von helmholtzschen Ohrresonatoren (siehe Bild 11 b) hat man noch zu Beginn des vorigen Jahrhunderts – bis etwa zur Einführung der Elektronenröhre in die Verstärkertechnik – Klanganalysen durchgeführt, fast genau so, wie Hermann von Helmholtz das um 1859 tat.

Bild 12 zeigt ein Berechnungsbeispiel für die Bestimmung der Resonanzfrequenz  $f_{res}$  eines ungedämpften Helmholtz-Resonators.

## Ausblick

Im ersten Teil dieser Beitragsreihe haben wir uns neben vielen Grundbegriffen vornehmlich mit der Schallausbreitung im Freien befasst. Im nachfolgenden zweiten Teil wird auch auf die Schallausbreitung in geschlossenen Räumen eingegangen. Dort lernen wir neue Begriffe kennen wie z. B. Reflexion, Brechung, Beugung, Absorption und diffuses Schallfeld. Hinzu kommen weitere Begriffe wie z. B. Reflexionsfaktor, Absorptionsgrad und Nachhallzeit. Das Schallabsorptionsvermögen der

Begrenzungsflächen eines Raums ist von großer Bedeutung für den Schalldruckpegel, der dort entsteht, sei es beim Sprechen, Singen oder bei der Beschallung durch Rundfunk und/oder Fernsehen. Auch die Schalldurchlässigkeit von Wänden und ähnlichen Bauteilen kommt dort zur Sprache. **ELV**

Aus dem Hohlraumvolumen  $V$  und den Abmessungen des Resonatorhalses (Querschnitt  $S$  und Radius  $R = d_i/2$ ), siehe dazu Abb. 11, kann die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  nach der nachstehenden Formel berechnet werden:

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot R\right)}}$$

Der Summand  $\frac{\pi}{2} \cdot R$  berücksichtigt die doppelte Mündungskorrektur zu beiden Seiten des Halses.

$S$  = Querschnitt des Resonatorhalses;  $V$  = Volumen des Resonators

**Zahlenbeispiel:**  $d_i = 10 \text{ mm} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $l_{\text{Hals}} = 17 \text{ mm} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $d_v = 40 \text{ mm} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $l_v = 30 \text{ mm} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $c = 343 \text{ m/s}$  }  $f_{res} = \underline{500 \text{ Hz}}$   
(Symbole, siehe Abb. 11)

Bild 12: Die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  eines Helmholtz-Resonators kann aus den Abmessungen des Resonatorhohlraums und des Resonatorhalses berechnet werden.

## Unser Leserwettbewerb – teilen Sie Ihr Lieblingsprojekt!

**Machen Sie mit!**

Jede veröffentlichte Anwendung wird mit einem Warengutschein in Höhe von 200 Euro belohnt.



Das umfangreiche Angebot von ELV Haustechniksystemen, Produkten und Bausätzen bietet für viele Leser den Ausgangspunkt für eigene kreative Ideen. Haben auch Sie ein Projekt entwickelt, das andere Leser interessieren könnte?

Alles, was nicht gegen Gesetze oder z. B. VDE-Vorschriften verstößt, ist für uns interessant. Schreiben Sie uns, fotografieren Sie Ihr Projekt, berichten Sie von Ihren Erfahrungen und Lösungen. Teilen Sie Ihre fantasievolle Idee mit den Lesern des ELV Journals!

Die interessantesten Anwendungen werden redaktionell bearbeitet und im ELV Journal mit Nennung des Namens vorgestellt.



**Per E-Mail**  
leserwettbewerb@elv.de



**Per Post**  
ELV Elektronik AG, Leserwettbewerb,  
26787 Leer

Die Auswahl der Veröffentlichungen wird allein durch die ELV Redaktion ausschließlich nach Originalität, praktischem Nutzen und realisierter bzw. dokumentierter Ausführung vorgenommen, es besteht kein Anspruch auf Veröffentlichung, auch bei themengleichen Lösungen. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.** Für Ansprüche Dritter, Beschädigung und Verlust der Einsendungen wird keine Haftung übernommen. Alle Rechte an Fotos, Unterlagen usw. müssen beim Einsender liegen. Die eingesandten Unterlagen und Aufnahmen verbleiben bei der ELV Elektronik AG und können von dieser für Veröffentlichungen und zu Werbezwecken genutzt werden.



[www.leserwettbewerb.elv.de](http://www.leserwettbewerb.elv.de) ...at ...ch