

Physikalische Grundlagen des Lärms und der Lärmbekämpfung

W. Bosshard

Artikel eingegangen am 18. Januar 1971

Zusammenfassung

Lärm ist eine unliebsame Form von Schall; zu seiner Beurteilung sind zunächst die den Schall kennzeichnenden Größen wichtig: die Lautstärke, die Tonhöhe und die Klangfarbe. Außerdem sind aber noch psychologische Faktoren maßgebend.

Die Lärmbekämpfung kann an der Quelle, bei der Ausbreitung oder am Empfänger erfolgen. Am wirksamsten ist die aktive Abwehr an der Quelle (Vermeiden der primären Ursachen, Behinderung der Schwingungen – vor allem durch dynamische Dämpfung).

Bei der Ausbreitung wirken Zwischenschichten aus geeigneten Materialien dämmend; für Luftschall müssen es schwere Medien sein (massive Mauern!), während die Übertragung von Körperschall durch leichte, weiche Materialien behindert werden kann.

Lärm ist lästiger Schall; wer Lärm wirksam bekämpfen will, muß daher mit den physikalischen Grundlagen des Schalls und seiner Ausbreitung vertraut sein.

Schall nennen wir das, was der Mensch mit dem Ohr als Hörempfindung wahrnehmen kann. Je nach Art der Übertragung wird zwischen Luftschall und Körperschall unterschieden. Die wichtigsten Merkmale des Schalls sind Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe.

Lautstärke

Beim Luftschall handelt es sich um periodische Druckschwankungen der Luft; die Lautstärke hängt ab von der Amplitude dieser Druckschwankungen. Neben der Amplitude (die in N/m^2 oder in μb gemessen werden kann) wird häufig die *Schallintensität* J angegeben; sie ist proportional dem Quadrat der Druckamplitude (Maßeinheit: W/m^2). Noch zweckmäßiger ist der sogenannte *Schallpegel* L , er ist ein logarithmisches Maß für die Stärke einer Schallwelle; man vergleicht dabei mit einer gegebenen Intensität J_0 und bildet den Zehnerlogarithmus des Quotienten. Die Einheit heißt 1 Bel = 1 B, aus praktischen Gründen verwendet man aber stets

die zehnmal kleinere Einheit, das *Dezibel* dB. Für die Berechnung des Schallpegels in dB gilt also

$$L = 10 \log \frac{J}{J_0}$$

oder, wegen der schon erwähnten quadratischen Abhängigkeit von der Druckamplitude,

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

Für absolute Angaben des Schallpegels hat man einen Bezugsschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2$ (Effektivwert) festgelegt (was einer Intensität von etwa $10^{-16} W/m^2$ entspricht).

Der Zusammenhang zwischen diesen physikalischen Größen, welche die Stärke der Schallwelle beschreiben, und der vom Menschen empfundenen Lautstärke ist recht kompliziert und individuell verschieden. Damit ein Schall überhaupt gehört werden kann, muß er eine gewisse Mindestintensität, die sogenannte *Hörschwelle*, übersteigen. Diese Hörschwelle ist stark frequenzabhängig; sie ist am tiefsten bei Frequenzen von etwa 1000 Hz bis 4000 Hz, bei sehr geringen und sehr hohen Frequenzen liegt sie um viele Zehnerpotenzen höher. Überschreitet die Schallintensität jedoch einen bestimmten Betrag, so tritt Schmerzempfindung ein. Auch

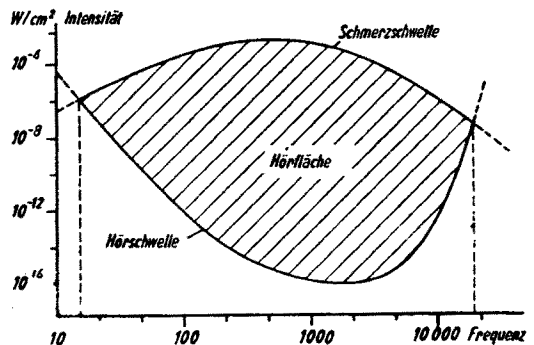


Abb. 1 Hörbereich des menschlichen Ohrs

die *Schmerzschwelle* ist frequenzabhängig; im mittleren Frequenzbereich liegt sie am höchsten.

Ist ein Schall intensitätsmäßig stärker als die Hörschwelle, aber schwächer als die Schmerzschwelle, so ist er hörbar. Die Kurven der Hörschwelle und der Schmerzschwelle umranden die sogenannte Hörfläche, die beiden Schnittpunkte legen die tiefste und die höchste hörbare Frequenz fest (bei Jugendlichen etwa 16 Hz bzw. etwa 20 000 Hz). Mit zunehmendem Alter verschiebt sich die Hörschwelle stark nach oben, die obere Hörgrenze senkt sich dadurch erheblich.

Je nach Intensität der Schallwelle empfindet der Mensch verschiedene Lautstärken; wegen des individuellen Verlaufs der Hörschwelle kann kein genauer allgemeingültiger Zusammenhang angegeben werden. Aus sehr vielen Messungen und subjektiven Vergleichen kann man aber Angaben machen, die gewisse Mittelwerte darstellen, also etwa für einen normalhörenden Menschen gelten können. Die Kurven gleicher Lautstärkeemp-

findung – Lautstärken werden in *Phon* gemessen – sind für das einzelne Individuum nicht streng maßgebend; auch sagen sie nichts darüber aus, wie lästig ein Schall empfunden wird.

Tonhöhe

Die Tonhöhe hängt ab von der Schwingungsdauer der Schalldruckschwankungen: je rascher die Schwingungen erfolgen, desto höher empfinden wir den Ton. Der sogenannte Normalton *a* entspricht 440 Schwingungen in einer Sekunde (440 Hz). Tonhöhenunterschiede (Intervalle) erscheinen uns dann gleich, wenn das Verhältnis der Schwingungsdauer dasselbe ist; eine Halbierung der Schwingungsdauer empfinden wir als Tonhöhenänderung um eine Oktave.

Klangfarbe

Bei gleicher Schwingungsdauer kann der Schwingungsablauf (Oszillogramm) noch verschieden sein; wir empfinden dann zwar gleiche Tonhöhe, sagen aber, die *Klangfarbe* sei anders (Beispiele: Klangfarbe verschiedener Instrumente bei gleicher Tonhöhe).

Mathematisch läßt sich jede beliebige Schwingungskurve in lauter einfache sinusförmige Kurven verschiedener Periodizität zerlegen: Frequenzanalyse. Dies bedeutet, daß ein Schall verschiedene Frequenzen enthalten kann; je nach Zusammensetzung und Stärke der Einzelfrequenzen empfinden wir die verschiedenen Klangfarben. Das sogenannte *Frequenzspektrum* gibt diese Zusammensetzung wieder und kann gewisse Anhaltspunkte über die Lästigkeit eines Lärms vermitteln (großer Anteil an hohen Frequenzen).

Das menschliche Ohr macht eine Art Frequenzanalyse und übermittelt das «Frequenzspektrum» über den Hörnerv dem Gehirn.

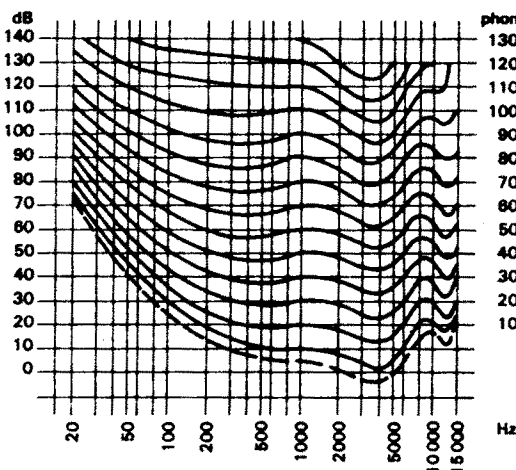


Abb. 2 Kurven gleicher Lautstärkeempfindung (ISO-Empfehlung)

Schallausbreitung

Jede periodische Bewegung geeigneter Frequenz und Stärke kann Schall erzeugen; für Luftschall können es schwingende feste Körper oder Gase sein, Körperschall kann verursacht werden durch Erschütterungen aller Art. Luftschall erreicht unser Ohr über das Trommelfell, während Körperschall durch direkte Übertragung zum Innenohr gelangen kann.

Für alle Wellen gilt die Beziehung

Ausbreitungsgeschwindigkeit
= Wellenlänge mal Frequenz

In Luft von Raumtemperatur beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen rund 340 m/s, in Wasser 1,4 km/s und in Stahl 5 km/s.

Die Wellenlängen des Luftschalls liegen demnach etwa zwischen 20 m und 2 cm.

In isotropen Medien breiten sich Schallwellen im wesentlichen geradlinig aus. Ist die Schallquelle klein gegenüber der Wellenlänge, so erfolgt die Verteilung gleichmäßig nach allen Seiten, und die Schallintensität nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab. Eine Abstandsverdoppelung ergibt daher eine Abnahme um 6 dB.

Hindernisse, die wesentlich größer sind als die Wellenlänge, schirmen erheblich ab.

Die Verluste durch Absorption des Schalls in Luft sind gering und können meist vernachlässigt werden.

An der Grenze zweier Medien wird eine Schallwelle in der Regel aufgeteilt in eine durchgehende Welle und eine zurückgeworfene (reflektierte) Welle. Für letztere gilt das Reflexionsgesetz, das heißt, die Welle geht unter dem gleichen Winkel von der Grenzfläche weg, unter dem die ursprüngliche Welle auftrat. Durch Reflexion an gekrümmten Flächen kann eine Sammel- oder Zerstreuungswirkung eintreten (Schall an Gewölben, Schall an Baumstämmen reflektiert).

Der Anteil der Schallintensität, der in das zweite Medium übertritt, ist um so größer, je weniger sich die akustischen Widerstände der beiden Medien unterscheiden. Der akustische Widerstand ist das Produkt aus der Dichte des Materials und der Schallgeschwindigkeit in diesem Material.

Lärmbekämpfung

Grundsätzlich bestehen drei Möglichkeiten der Lärmbekämpfung:

an der Quelle (aktive Abwehr)
bei der Ausbreitung

beim Empfänger (passive Abwehr, individueller Schutz).

Wenn immer möglich sollte das Übel *an der Quelle* behoben werden. Dies setzt die Kenntnis der möglichen Schallquellen voraus; anzustreben ist stets eine Bekämpfung der primären Ursache.

Feste Körper können durch Schläge, Reibung oder periodische Kräfte in Schwingung kommen. Schläge können auf verschiedenste Weise vermieden werden, wie zum Beispiel durch Polsterung der berührenden Flächen (Gummisohlen, Teppiche), durch Verringern des Weges (Spiel von Ventilstößeln), durch Schrägverzahnung bei Getrieben usw. Reibung kann durch Schmierung oder durch Glätten der Flächen herabgesetzt werden. Durch Auswuchten rotierender Teile lassen sich oft periodische Kräfte unterdrücken.

Werden *Gasströme* periodisch unterbrochen, so kann recht lauter Luftschall entstehen (Auspuffgeräusche, Ansauggeräusche, Nutenlärm elektrischer Maschinen). Durch Ausgleich der Stöße (Auspufftopf, Schalldämpfer, Mehrzylinderomotoren) wird der Lärm beträchtlich vermindert.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der *Behinderung der Schwingung*; besonders wirksam ist die *dynamische Dämpfung*, bei wel-

cher Schwingungsenergie auf ein anderes System abgeleitet wird («Antidröhn»-Beläge, lockere Einspannung, Lagerung in Gummi usw.).

Oft ist es möglich, die Frequenz so zu verlagern, daß keine starke Schwingung entstehen kann (Vermeiden der Resonanz, anderes Einspannen von Werkstücken) oder daß die Schwingung aus dem Bereich niedriger Hörschwellen herausgerückt wird.

Wenn zwischen Vorder- und Rückseite eines schwingenden Gegenstandes ein *Druckausgleich* erfolgen kann, so kann kein starker Luftschall abgestrahlt werden. Förderung des Druckausgleichs vermindert den Lärm erheblich (gelochte Bleche, Siebe, Gitter anstelle massiver Bleche). Da großflächige Körper besser abstrahlen, so ist eine Übertragung der Schwingung auf solche zu vermeiden (Gegenbeispiele: Stimmgabel mit Resonanzkasten, Saiteninstrumente, Motoren auf schwingungsfähigen Unterlagen).

Ist die Lärmbekämpfung an der Quelle nicht möglich, so soll versucht werden, den Lärm *bei der Ausbreitung* einzuschränken, was auf verschiedene Weise erreicht werden kann. Durch Einbringen von *Zwischenschichten* mit anderm akustischem Widerstand kann eine starke *Dämmung* erreicht werden. Bei Luftschall müssen schwere, schallharte Medien eingebracht werden (Wände, Glasscheiben, Einkapselung lärmender Geräte), wobei darauf geachtet werden muß, daß dünne Schichten nicht zu Biegeschwingungen angeregt werden. Die Zwischenschicht dämmt den

Luftschall um so besser, je mehr Masse sie hat, bei hohen Frequenzen ist die Dämmwirkung größer. Zur Dämmung von Körperschall müssen schallweiche Materialien eingebracht werden (Gummifüßchen, Filzunterlagen, gefedert gelagerte Maschinen, Verpackung empfindlicher Güter, Trittschallisolierung in Bauten).

Das Anbringen schallabsorbierender Flächen kann zur Minderung der Schallintensität in einem Raume führen: *Schallschluckung, Schalldämpfung*. Die Schallabsorption ist vor allem groß bei porösen, lockeren Stoffen (Teppiche, Vorhänge, Polstermöbel, Neuschnee, Schallschluckstoffe, Auskleidung von Lüftungskanälen, Auspuffrohren usw.).

Die passive *Entstörung am Empfänger* erfolgt mit den gleichen Mitteln wie die Behinderung bei der Ausbreitung (Einkapselung, Hindernisse, Hörschutzgeräte, weiche Lagerung empfindlicher Instrumente, Pneubereitung und Polsterung bei Fahrzeugen, Auskleiden der Umgebung mit schallschluckenden Stoffen).

Wenn man sich die Gesetze über das Entstehen und die Ausbreitung von Schall stets in Erinnerung ruft und die sich daraus ergebenden Schlüsse wirklich zieht, so können erhebliche Lärminderungen erreicht werden, oft sogar ohne wesentlichen zusätzlichen Aufwand.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Werner Bosshard, Physikprofessor am Technikum Winterthur, 8400 Winterthur