

12. Schall

12.1 Das Wesen des Schalls

Schallwellen sind mechanische Schwingungen eines elastischen Mediums. Ausgehend von einer Schallquelle, einem schwingenden Körper, breiten sie sich in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen in Form von Druckschwankungen (Druckwellen) aus. Die Lehre vom Schall ist die Akustik.

Schwingende Körper aller Aggregatzustände und Formen können Schallwellen übertragen. Sie werden als Schallquellen bezeichnet. Dabei kann es sich um Saiten, Stäbe, Platten, Luftsäulen, Membranen, Maschinen usw. handeln.

Werden die Schwingungen an die umgebende Luft abgegeben, spricht man von **Luftschall**.

Die schwingenden Körper, Gase und Flüssigkeiten können die Schwingungen auch auf feste Objekte übertragen. In diesem Fall handelt es sich um **Körperschall**.

12.1.1 Schallempfinden

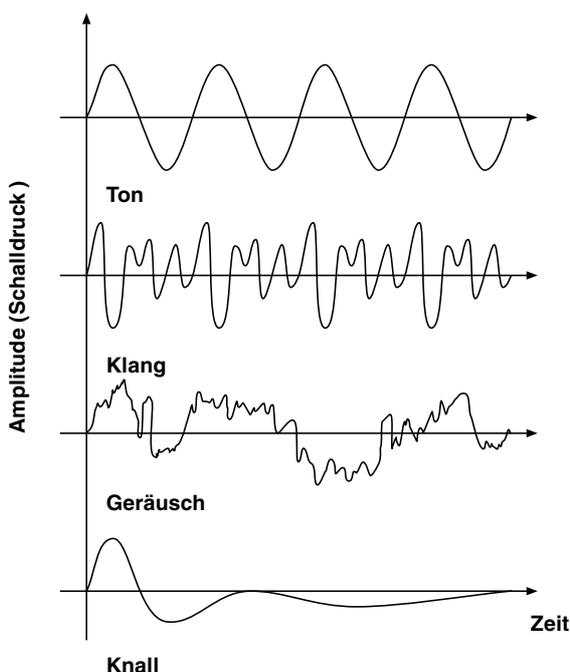


Bild 12.1 :
Die Schalleindrücke

Zwischen den von einer Schallquelle ausgehenden Schwingungen des Luftschalls und den Schallempfindungen eines Menschen bestehen folgende Zusammenhänge :

Amplitude der Schwingung

Die Amplitude ist die periodisch auftretende Druckabweichung, die in einer Schallwelle auftritt.

Sie entspricht der vom Menschen empfundenen Lautstärke eines Schalleindrucks.

Frequenz der Schwingung

Die Frequenz ist die Anzahl der Druckschwankungen während einer Zeiteinheit. Sie wird üblicherweise in **Hz** angegeben (Schwingungen pro Sekunde).

Sie entspricht der vom Menschen empfundenen Tonhöhe eines Schalleindrucks.

Schwingungsform

Man unterscheidet verschiedene Schwingungsformen die unterschiedliche Schalleindrücke hervorrufen :

- Ton.
Ein Ton (reiner Ton) ist eine Sinusschwingung.
- Klang.
Ein Klang ist die Überlagerung mehrerer Töne. Mehrere sinusförmige Schwingungen überlagern sich und bilden eine nichtsinusförmige Schwingung. Der Ton mit der niedrigsten Frequenz bestimmt die Tonhöhe der gesamten Schallempfindung. Die anderen Töne (Obertöne) verursachen den Eindruck der Klangfarbe.
- Geräusch.
Ein Geräusch ist eine unregelmäßige Schwingung. Es ist ein Gemisch aus sehr vielen Frequenzen unterschiedlicher Größenordnungen.
- Knall.
Ein Knall ist ein einzelner, kurzer und starker Schalleindruck.

12.2 Wichtige Begriffe der Akustik

12.2.1 Schalldruck

Der Schalldruck \tilde{p} ist die periodische Druckabweichung (Über- und Unterdruck, Wechseldruck) die in einer Schallwelle auftritt. Er wird in **Pa** (10^{-5} bar) angegeben.

In gasförmigen Medien ist der Schalldruck dem vorhandenen Gasdruck **p** überlagert. Der Schalldruck ist stark von verschiedenen Faktoren, wie z.B der Schalleistung der Schallquelle, den räumlichen Gegebenheiten usw. abhängig.

Der Schalldruck bewegt sich zwischen ca. 2×10^{-4} Pa beim Ticken einer Uhr und ca. 65 Pa beim Start eines Flugzeuges in unmittelbarer Nähe.

12.2.2 Der Schallpegel

Um die akustischen Größen besser handhaben zu können, wird der Wert zu einer Bezugsgröße ins Verhältnis gesetzt und logarithmiert. Die Pegel sind als Logarithmus einer Verhältnisgröße dimensionslos. Es wird zur Kennzeichnung die Bezeichnung **dB** (Dezibel) hinzugefügt.

Der Schalldruckpegel wird zum Bezugsdruck $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa ins Verhältnis gesetzt und logarithmiert. Für den Schalldruckpegel gilt :

$$L_p = 20 \lg \frac{\tilde{p}}{p_0} \text{ dB}$$

L_p = Schalldruckpegel [dB]

\tilde{p} = Schalldruck [Pa]

p_0 = Bezugsschalldruck [2×10^{-5} Pa]

Die anderen Größen der Akustik werden auf ähnliche Weise behandelt. Die Akustik kennt fast nur Pegel zur Kennzeichnung der Größen.

12.2.3 Der Schalleistungspegel

Der Schalleistungspegel gibt die Schallenergie an, die eine Schallquelle pro Sekunde abstrahlt. Sie ist eine maschinenspezifische Größe (Emissionsgröße) und kann durch Schalldämmmaßnahmen u.ä. beeinflusst werden.

Mit Hilfe des Schalleistungspegels einer Maschine kann unter Berücksichtigung der Entfernung, der baulicher Gegebenheiten und anderer Schallquellen annähernd der Schalldruckpegel für einen bestimmten Ort berechnet werden. Eine aufwendige Messung erübrigt sich zum Teil.

12.3 Das Schallempfinden des Menschen

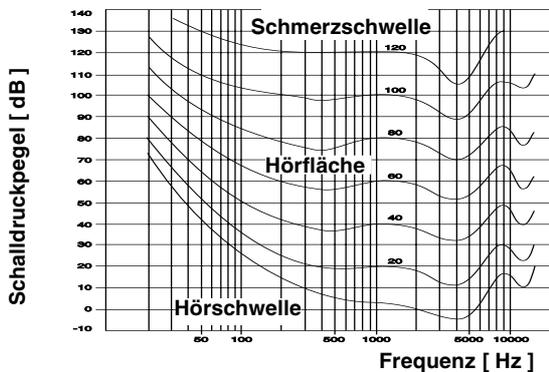


Bild 12.2 :
Die Hörfläche des Menschen

12.3.1 Der Lautstärkepegel

Für das menschliche Ohr sind in der Regel nur die Frequenzen von 16 bis 20000 Hz hörbar. Höhere Frequenzen bezeichnet man als Ultraschall, niedrigere als Infraschall. Der wahrnehmbare Schalldruck liegt zwischen 10^{-5} Pa und 100 Pa, wobei ein Schalldruck von 100 Pa fast immer zur sofortigen Zerstörung des menschlichen Gehörs führt.

Das menschliche Gehör nimmt die verschiedenen Schalldrücke und Frequenzen nicht mit der gleichen Lautstärke wahr. Eine Übersicht über die vom Menschen wahrnehmbaren Schalldruck- und Frequenzbereiche bietet die Hörfläche. Die untere Begrenzungskurve zeigt die **Hörschwelle** und die obere Kurve die **Schmerzschwelle**. Den größten Schalldruckbereich nimmt das Ohr bei ca. 1 000 Hz wahr.

Der Schalldruck ist eine physikalische Größe und somit meßtechnisch erfaßbar. Die Lautstärke, mit der ein Mensch den Schalldruck empfindet, ist eine physiologische Größe, die vom Gehörsinn abhängt.

Der Lautstärkepegel ist eine empirisch ermittelte Größe. In Versuchsreihen wurde das Lautstärkeempfinden verschiedener Menschen getestet, und ein Durchschnittswert gebildet. Der Lautstärkepegel wird in **Phon** angegeben.

Bei 1 000 Hz stimmt der Lautstärkepegel mit dem unbewerteten Schalldruckpegel überein. Der Lautstärkepegel ist nicht mit Meßgeräten nachvollziehbar. Aus diesem Grund sind Vergleichsmessungen und Berechnungen nicht möglich, bzw. sehr schwierig.

12.3.2 Bewertete Schallpegel dB (A)

Die akustischen Größen müssen dem Wahrnehmungsvermögen des menschlichen Ohres so angepaßt werden, daß die Größen technisch nachvollziehbar sind. Abhängig von der Frequenz wird der reale Schalldruckpegel mit bestimmten Korrekturwerten der Empfindlichkeit des Ohres angenähert. Für diese Korrekturwerte gibt es international gültige Bewertungskurven.

Nachfolgend verschiedene Anwendungsbereiche für unterschiedliche Bewertungskurven.

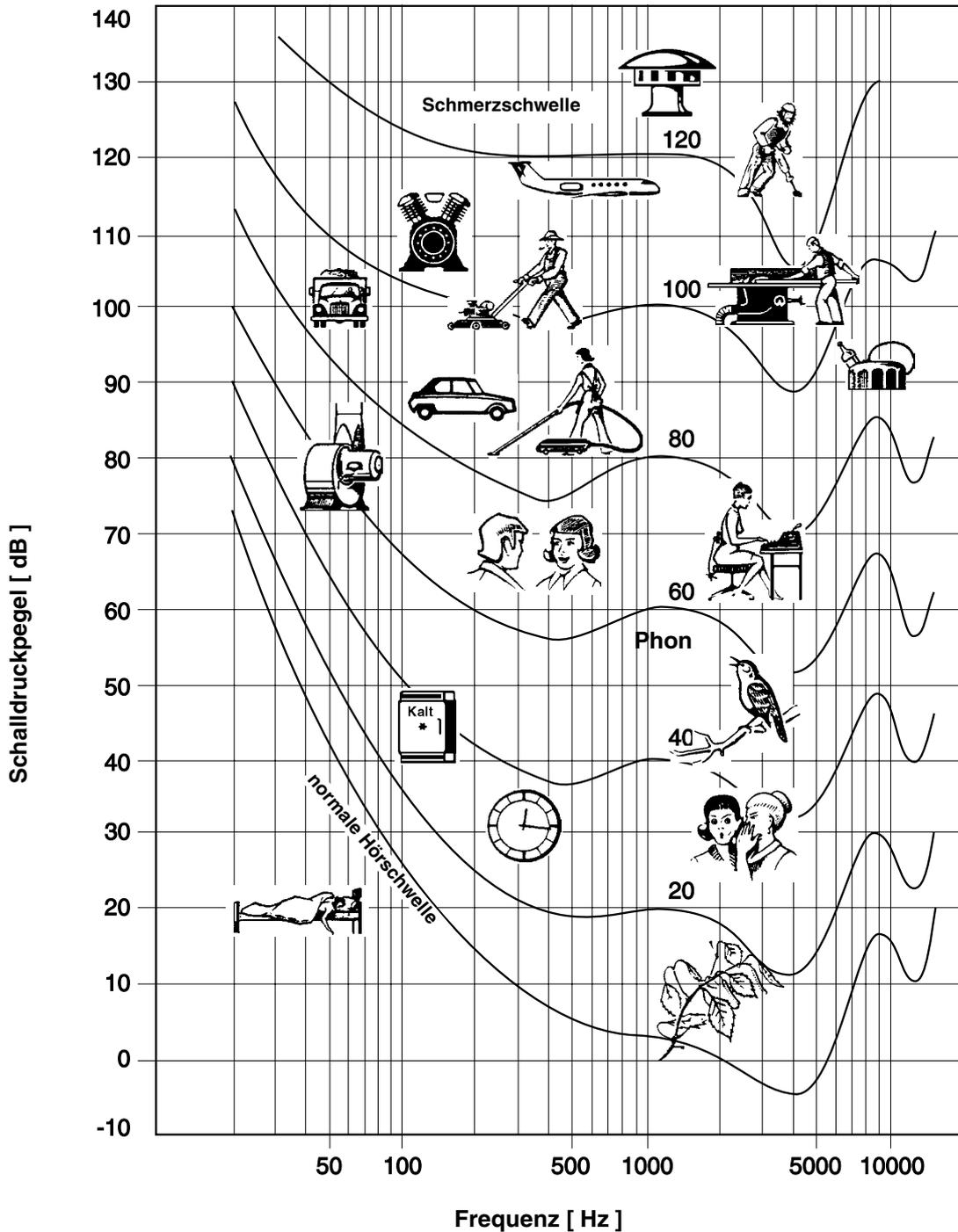
- A** – Bewertungskurve für $L_N = 30 - 60$ Phon.
- B** – Bewertungskurve für $L_N = 60 - 90$ Phon.
- C** – Bewertungskurve für linearen Hörbereich.
- D** – Bewertungskurve für Flugzeuggeräusche.

Ein bewerteter Schallpegel wird durch das Nachsetzen des Buchstabens der Bewertungskurve, wie z.B. dB (A), gekennzeichnet.

Für die Geräuschmessung für Kompressoren und andere Maschinen wird in erster Linie die A-Bewertungskurve angewendet. Die Geräuschmessung nach DIN 45635 benutzt A-bewertete Schalldruckpegel.

12.3.3 Lautstärke im Vergleich

Das folgende Diagramm zeigt neben der Hörfläche eines durchschnittlichen Menschen, die zwischen der Hörschwelle und der Schmerzschwelle liegt, verschiedene Beispiele für unterschiedliche Lautstärken.



Das Ticken einer Uhr entspricht einem Schalldruckpegel von ca. 20 dB (A).

Normale Umgangssprache in ca. 1 m Entfernung entspricht einem Schalldruckpegel von ca. 70 dB (A).

12.4 Verhalten des Schalls

Die Ausbreitung und das allgemeine Verhalten des Schalls hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Schalleistung einer Maschine (Schallquelle) konstant bleibt.

12.4.1 Entfernung von der Schallquelle

Der von einer Schallquelle erzeugte Schalldruck nimmt mit zunehmender Entfernung zwangsläufig ab. Die konstante Schalleistung einer Schallquelle verteilt sich mit zunehmender Entfernung auf eine immer größere Fläche (Streuung). Die Form der Schallwelle spielt dabei eine große Rolle. Maschinen und Kompressoren strahlen die Schallenergie fast immer in Form einer Halbkugel ab, da sie üblicherweise auf festem Untergrund stehen.

Der Schalldruckpegel nimmt dann, bezogen auf den Wert in 1 m Entfernung, entsprechend der folgenden Tabelle ab :

Entfernung von der Schallquelle [m]	1	2	5	10	25	50	100
Schalldruckpegelminderung [dB (A)]	0	5	12	16	23	28	32

Diese Anhaltswerte beziehen sich auf eine ungestörte Schallausbreitung auf einer freien Fläche. Ein gewisser Reflexionsanteil durch einen normalen, schallharten Boden ist berücksichtigt.

Beispiel

Ein superschallgedämmter BOGE-Schraubenkompressor S 21 steht in einer großen Halle. Er erzeugt nach DIN 45635 einen Schalldruckpegel von 69 dB (A). In 10 m Entfernung beträgt der vom Kompressor erzeugte Schalldruckpegel nur noch ca. 53 dB (A).

12.4.2 Reflexion und Absorption

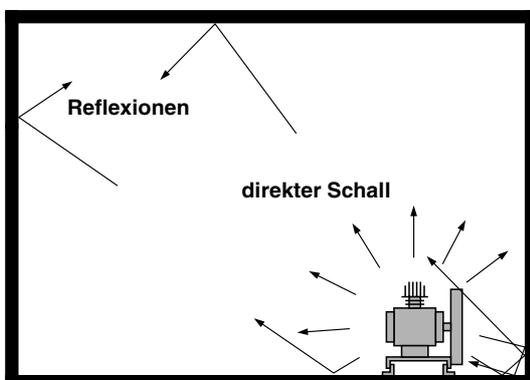


Bild 12.3 :
Schallausbreitung in einem geschlossenen Raum

Ein Teil des Schalls wird durch Wände u.ä. reflektiert. In Räumen entsteht durch die Reflexionen ein diffuses Feld ungerichteter Schallwellen. Der allgemeine Schalldruckpegel im Raum wird durch den reflektierten Schall erhöht. Der zurückgeworfene Schall ist auch als Hall bekannt.

Schallharte Materialien mit glatter Oberfläche wie, z.B. Ziegelwände reflektieren einen großen Teil des einfallenden Schalls. Die Form der Oberfläche beeinflusst die Reflexionen stark. Kleidet man einen Raum mit speziell angeordneten Dämmstoffpyramiden aus, entsteht ein schalltoter Raum ohne Reflexionen. In solchen Räumen werden Schalldruckmessungen u.ä. mit wissenschaftlicher Genauigkeit vorgenommen.

Den nicht reflektierten Rest des Schalls absorbieren Wände oder Gegenstände. Das Material leitet den absorbierten Schall weiter und dämpft ihn. Er wird meist an anderer Stelle wieder an die Luft übertragen. Materialien mit einem hohen Elastizitätsmodul, wie z.B. Stahl, leiten Schall sehr gut. Die Dämpfung ist meist gering.

12.4.3 Dämpfung des Schalls

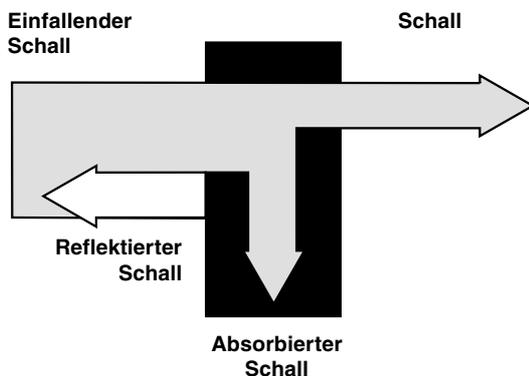


Bild 12.4 :
Schalldämmung durch Wände

12.4.4 Schallausbreitung in Rohren und Kanälen

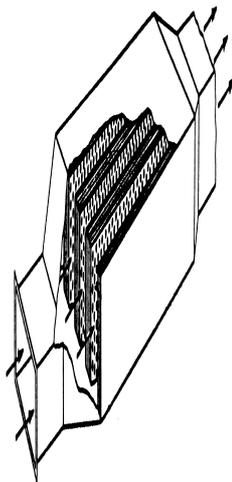


Bild 12.5 :
Absorptionsschalldämpfer mit geraden Kulissen

Dämpfung ist die Umwandlung von Schallenergie in Wärme, erzeugt durch die Reibung der Teilchen aneinander. Der Schall wird dabei absorbiert. Eine Dämpfung des Luftschalls erzielt man mittels poröser oder faseriger Absorptionsmaterialien mit einem niedrigen Elastizitätsmodul und einer hohen Flächenmasse (kg/m^2). Die Dämpfung des Schalls durch entsprechende Materialien ist auch vom Frequenzspektrum des Schalls abhängig. Verschiedene Frequenzen werden unterschiedlich stark gedämpft.

Die Dämpfung des Schalls durch die Luft ist stark von der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängig. Unter normalen Umständen wird sie erst ab 200 m Entfernung spürbar. Bei hoher Luftfeuchtigkeit, z.B. bei Nebel, ist die Dämpfung größer.

Für die Ausbreitung von Schall in Rohren und Kanälen gelten besondere Gesetze. Ein strömendes Medium und die Reflexionen im engen Kanal unterstützen die Ausbreitung des Schalls. Besonders bei der Nutzung der warmen Abluft eines Kompressors als Raumheizung, müssen Maßnahmen gegen die ungehinderte Schallausbreitung in den Kanälen getroffen werden.

Ausgehend von einem schallgedämmten Kompressor wird eine gerichtete Schallwelle in den Abluftkanal eingestrahlt. Der Schall, der hier nicht durch die Schalldämmung reduziert wird, pflanzt sich durch das Kanalsystem fort. Er gelangt ungehindert, durch die Belüftungsöffnungen in die beheizten Räume.

Es gibt verschiedene Maßnahmen zur Minderung der Schallfortpflanzung in Kanälen oder Rohren :

- Längsdämpfung.
Die Kanäle werden mit stark absorbierenden Materialien ausgekleidet. Dadurch nimmt die Schallenergie und der Schalldruckpegel im Kanal ab.
- Absorptionsschalldämpfer.
Ein Teil des Kanals wird locker mit einem schallabsorbierenden Material (Steinwolle o.ä.) gefüllt. Es absorbiert einen großen Teil der Schallenergie, ähnlich wie bei Wänden. Der große Nachteil dieses Schalldämpfers ist sein hoher Strömungswiderstand. Bei Kanalsystemen ohne einen großen Abluftventilator ist der Einbau derartiger Schalldämpfer nicht empfehlenswert.

12.4.5 Schalldruckpegel mehrerer Schallquellen

Stehen mehrere Schallquellen in einem Raum, verstärkt sich der Schalldruckpegel. Je mehr Schallenergie abgestrahlt wird, desto höher ist der Schalldruck. Die empfundene Lautstärke nimmt zu. Die Zusammenhänge sind nicht linear. Sie sind stark von baulichen Gegebenheiten, dem Schalldruckpegel der einzelnen Quellen und dem Frequenzspektrum der Quellen abhängig. Daher werden hier, zur Veranschaulichung der Zusammenhänge, nur die beiden einfachsten Fälle aufgeführt.

Die hier gemachten Angaben sind nur als Anhaltswerte zu betrachten. Da viele Einflußgrößen unberücksichtigt geblieben sind, können die Werte im Einzelfall stark abweichen.

12.4.5.1 Mehrere Schallquellen mit gleichem Pegel

Wenn zwei oder mehrere Schallquellen mit gleichem Schalldruckpegel in einem großen Raum stehen, ist der Zusammenhang relativ einfach. Die folgende Tabelle gibt die Zunahme des Gesamtschalldruckpegels ohne Berücksichtigung von eventuellen Reflexionen oder Störgeräuschen an :

Anzahl der Schallquellen	2	3	4	5	10	15	20
Zunahme des Schalldruckpegels [dB (A)]	3	5	6	7	10	12	13

Um den Gesamtschalldruckpegel zu erhalten, muß die Zunahme des Schalldruckpegels zum Schalldruckpegel der einzelnen Schallquelle addiert werden.

Beispiel

Es stehen drei superschallgedämmte BOGE-Schraubenkompressoren S 21 in einer großen Halle. Jeder erzeugt nach DIN 45635 einen Schalldruckpegel von 69 dB (A). Der Gesamtschalldruckpegel liegt also bei 74 dB (A) [69 + 5].

12.4.5.2 Zwei Schallquellen mit unterschiedlichem Pegel

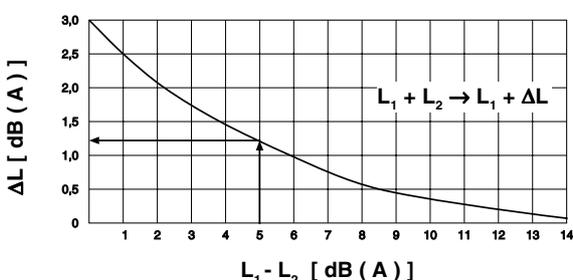


Bild 12.6 : Schallverstärkung bei zwei Quellen mit unterschiedlichem Pegel

Der Summenschalldruckpegel **Zweier** ungleicher Schalldruckpegel (L_1 u. L_2) ist mit Hilfe eines Diagramms zu ermitteln. Bei mehreren Schallquellen mit unterschiedlichem Pegel werden die Zusammenhänge sehr kompliziert.

Das Diagramm zeigt, um wieviel Dezibel (ΔL) der höhere der beiden Schalldruckpegel L_1 in Abhängigkeit von der Differenz der beiden Schalldruckpegel ($L_1 - L_2$) steigt.

Beispiel

Ein Kompressor mit einem Schalldruckpegel nach DIN 45635 von 69 dB (A) und ein Kompressor mit einem Schalldruckpegel von 74 dB (A) stehen im selben Raum. Der Gesamtschalldruckpegel beträgt in diesem Fall ca. 75,3 dB (A).
[74 - 69 = 5 \rightarrow 74 + 1,3 = 75,3]

12.5 Auswirkungen von Lärm

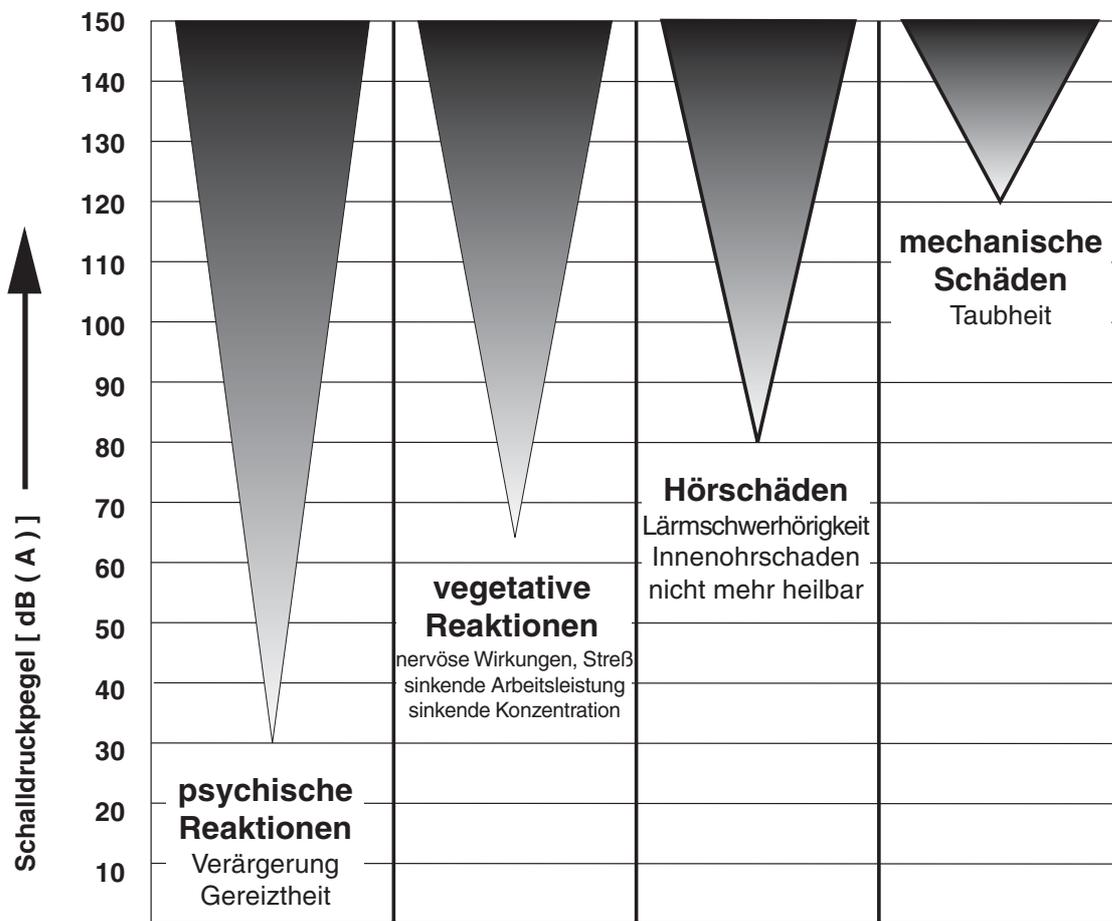


Bild 12.7 :
Gesundheitsschädlicher Lärm

Eine Form von Schall ist der Lärm. Dabei handelt es sich um unerwünschte, belästigende oder schmerzhafte Geräusche. Lärm hat verschiedene negative Auswirkungen, die vom Schalldruckpegel des Lärms abhängen :

- Konzentrationsstörungen
- Ein Schalldruckpegel von ca. **70 dB (A)** führt zur Störung der Sprachkommunikation.
- Ein Schalldruckpegel von **85 dB (A)** führt erfahrungsgemäß nach einer 8 Std.-Schicht zu vorübergehender Hörminderung. Hält diese akkustische Belastung über mehrere Jahre an, führt sie zu bleibenden Hörschäden.
- Ein Schalldruckpegel von **110 dB (A)** führt innerhalb von kurzer Zeit zu Hörminderungen. Hält diese Belastung über mehrere Stunden an, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit mit bleibenden Hörschäden zu rechnen.
- Ein Schalldruckpegel von **135 dB (A)** und mehr führt in den meisten Fällen zur sofortigen Zerstörung des Gehörs.

12.6 Geräuschmessung

Bei der Geräuschmessung an Kompressoren und ähnlichen Maschinen verwendet man in erster Linie das Hüllflächenverfahren nach DIN 45635. Andere angewandte Verfahren arbeiten nach Capi-Pneurop oder PN 8 NTC 2.3. Diese Normen schaffen die Voraussetzungen dafür, daß von Kompressoren und Maschinen unmittelbar an die umgebende Luft abgestrahlte Geräusche (Schalleistung) nach einheitlichen Verfahren ermittelt werden, die dadurch vergleichbar sind.

Geräuschmessungen an Kompressoren und Maschinen dienen vor allem der Feststellung, ob bezüglich der Geräuschmessung bestimmte Forderungen erfüllt werden. Die ermittelten Kennwerte sind u.a. geeignet für :

- Vergleich ähnlicher Maschinen.
- Vergleich verschiedener Maschinen.
- Abschätzen des Schalldruckpegels in einiger Entfernung.
- Überprüfung der Geräuschimmission hinsichtlich der Lärmschutzverordnungen.
- Planung von Schallschutzmaßnahmen.

12.7 Schalldämmung bei Kompressoren



Bild 12.8 :
Schallgedämmte BOGE Schraubenkompressoren

Beim Betrieb von Kompressoren treten teilweise Schalldruckpegel über 85 dB (A) auf. Wenn mehrere ungedämmte Kompressoren in einem Raum stehen, können auch erheblich höhere Schalldruckpegel auftreten. Da die Arbeitsschutzgesetze ab 85 dB (A) das Tragen von Gehörschutz empfehlen und ab 90 dB (A) vorschreiben, ist es oft vorteilhaft, schallgedämmte Kompressoren aufzustellen.

Schallgedämmte Kompressoren können in Arbeitsplatznähe aufgestellt werden. Das vermeidet Kosten für lange Leitungen, separate Kompressorräume und reduziert den Druckabfall in den Druckluftleitungen.

An die Materialien einer Schalldämmung werden bestimmte Anforderungen gestellt :

- Nicht brennbar.
- Staubunempfindlich.
- Ölunempfindlich.

Zur Schalldämmung bei Kompressoren verwendet man daher in erster Linie Mineralwolle (Steinwolle oder Glasfaser) und FCKW-freie, schwer entflammbare, selbstverlöschende Schaumstoffe, die in das Stahlblechgehäuse eingebunden werden.