

Grundlagen der Schallmesstechnik Schall, Lärm und Schallpegelmessungen



Ausgabe Juli 2017

Norsonic ist ein eingetragenes Markenzeichen von Norsonic A/S.

Alle Bemühungen wurden unternommen um vollständige und genaue Informationen anzugeben. Allerdings übernimmt Norsonic weder Verantwortung für die Benutzung noch für Folgeschäden aus der Benutzung dieser Informationen bzw. der hier beschriebenen Geräte. Weiterhin übernimmt die Norsonic-Tippkemper GmbH keine Verantwortung für jedwede Verletzung geistigen Eigentums Dritter, die sich aus solcher Verwendung ergeben könnte.

Zögern Sie nicht, mit uns Kontakt aufzunehmen.

Unsere Adresse lautet:

Norsonic Tippkemper GmbH, Zum Kreuzweg 12, 59302 Oelde-Stromberg
(Vertretung der Norsonic AS, P.O. Box 24, N-3421 Lierskogen, Norwegen)

Telefon: 02529-9301-0
Fax: 02529-9301-49
E-Mail: tippkemper@norsonic.de
Internet: www.norsonic.de

COPYRIGHT © Norsonic-Tippkemper GmbH – 2017

Alle Rechte vorbehalten

Inhaltsverzeichnis

Thema	Seitenzahl
Was ist Schall?	5
Die Wellenlänge von Schall	6
Skalierung von Schall	6
Das Dezibel	7
Das Dezibel und das Gehör	8
Der Unterschied zwischen Schalldruck und Schalleistung	9
»Große« und »kleine« Dezibelzahlen	12
Addition von Schallquellen	12
Kompensation des Hintergrundrauschens	14
Wenn die Maschine nicht abgeschaltet werden kann...	16
Bewertung	17
Ein Schallpegelmesser, der Schall so wahrnimmt, wie der Mensch	18
Die Bewertungskurven	20
Ermittlung des Schallpegels	23
Ansprechgeschwindigkeit der Anzeige	24
RMS, Impulse und Peak	25
Energetische Parameter L_{eq} und SEL	26
Messung des L_{eq}	27
Der Schalleinwirkungspegel SEL	28
Das Schallpegelmessgerät	30
Kalibrieren	33
Der Kalibriervorgang	33
Genauigkeit und Toleranzen	34
Messgeräteklassen	35
Raumakustik - Messungen an Maschinen	36
Reflexionsfreie Räume	36
Hallräume	37
Schallausbreitung	37
Die Realität: Normale Räume	38
Lärm am Arbeitsplatz	40
Typische Maßnahmen zur Lärminderung	41
Umgebungsärm	42
Statistik	42
Percentile (Überschreitungspegel)	44
Einige Grundregeln für Schallmessungen in der Praxis	45

Abschnitt 1

Schall, Lärm und Schallpegelmessungen

Was ist der Unterschied zwischen Schall und Lärm? Nicht nur die Lautstärke macht den Unterschied aus. Obwohl ein Flugzeug sehr laut ist (und auch für das Gehör gefährlich werden kann, wenn man sich ohne Gehörschützer zu nahe daran aufhält), kann das durch eine Mücke verursachte Geräusch ausreichen, den Schlaf zu unterbrechen.

Anstatt nur die Lautstärke als einziges Kriterium für den Grad von Lärm zu sehen, werden wir den Lärm als das betrachten, was er ist: Als unerwünschter Schall.

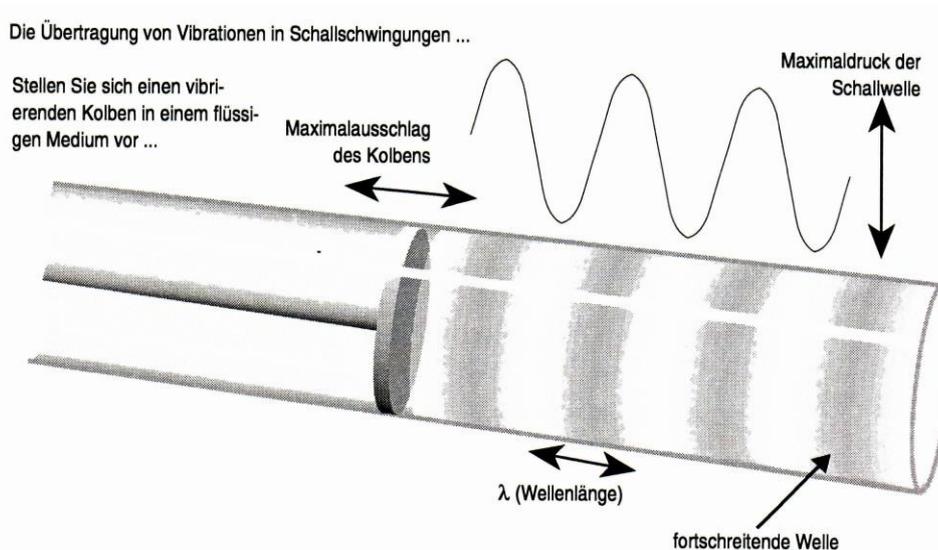
Dies scheint auf den ersten Blick eine ziemlich triviale Definition zu sein, hat aber durchaus Folgen.

- Da Lärm als unerwünscht empfunden wird, ist er eng mit den Gefühlen einer Belästigung verbunden.
- Lärm ist eng mit der Lautstärke verbunden, die wiederum ist im Zusammenhang mit der Häufigkeit und dem Zeitpunkt des Auftretens zu betrachten (Mücken verursachen tagsüber weniger Belästigung als in der Nacht – zumindest vom Standpunkt des Lärms).
- Tritt Lärm mit einer bestimmten Lautstärke auf, ist der primäre Effekt die gesundheitliche Beeinträchtigung und nicht die Belästigung.
- In den meisten Ländern gibt es gesetzliche Regelungen hinsichtlich des maximal zulässigen Lärms von Industrien, Bautätigkeiten, Verkehr etc. Die Absicht solcher Gesetze ist sowohl die Verminderung von Gehörschäden betroffener Personen, als auch die Steigerung der Lebensqualität, da Sekundärscheinungen, wie Bluthochdruck, oft auf Lärmeinwirkung zurückzuführen sind.
- Diese gesetzlichen Richtlinien erfordern eine Abschätzung des auftretenden Lärms hinsichtlich der Gefahr einer Gehörschädigung, bzw. der Übertretung eines Gesetzes. Lärm muss also gemessen werden.
- Die Art und Weise, wie der Lärm gemessen wird, muss über die Stärke des Lärms Aufschluss geben. Der Messvorgang hängt daher von der Lärmart ab. Alle Messungen, welche die gleichen Schallsituationen (z. B. Industrielärm) beschreiben, sind auf die gleiche Weise durchzuführen, andernfalls sind die Messungen nicht vergleichbar. Daher sind Messungen standardisiert.
- Die Natur des Lärms muss aus dem Gesichtswinkel der Messtechnik beschrieben werden – was im folgenden Abschnitt geschieht.

Was ist Schall?

Schall sind mechanische Schwingungen eines gasförmigen, flüssigen oder festen Mediums, über die Energie in Form von fortschreitenden Wellen von der Schallquelle abgestrahlt wird.

Dies ist eine strenge physikalische Definition von Schall. Wir beschränken für unsere Zwecke den Begriff Schall auf die Änderung des Schalldrucks, die vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden können.



Drücke werden traditionell mit einem Barometer gemessen. Jedoch ist dieses Messinstrument zu langsam, um die für das menschliche Ohr wahrnehmbaren Schalldruckänderungen zu erfassen. Oft ist auch die Empfindlichkeit zu gering.

Das menschliche Gehör hört Schall mit mindestens 20, aber nicht mehr als 20.000 Schwankungen pro Sekunde.

Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde wird als *Frequenz* bezeichnet, die Einheit für diese Größe ist 1 *hertz* [Hz]. In älterer Literatur kommen noch Cycles per second [cps] vor.

Das menschliche Gehör nimmt also Schall mit einer Frequenz von 20Hz bis 20.000Hz (=20kHz) wahr.

Natürlich sind auch Schalldruckschwingungen unter 20Hz noch Schall. Da diese unter der Gehörgrenze liegen, werden sie als *Infraschall* bezeichnet.

Schallschwingungen über 20kHz werden analog dazu als *Ultraschall* bezeichnet.

Die Wellenlänge von Schall

Zumindest in der »metrischen Welt« existiert die Drei-Sekunden-Regel bei Blitz und Donner: Die Anzahl von Drei-Sekunden-Einheiten ist gleichzeitig die Entfernung des Blitzes in Kilometern. Mit anderen Worten, die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* von Schall beträgt rund 340 m/s oder 1224 km/h.

Hat man die Frequenz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall bestimmt, kann daraus die Wellenlänge berechnet werden. Die Wellenlänge ist definiert als die Ausbreitungsgeschwindigkeit dividiert durch die Frequenz, oder mathematisch:

$$c = l \times f$$

wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit, f die Frequenz und l die Wellenlänge von Schall ist.

Die Wellenlänge ist somit indirekt proportional zur Frequenz.

Bei einer Frequenz von 20Hz beträgt die Wellenlänge 17m, bei 20kHz 1,7 cm.

Skalierung von Schall

Wie schon vorher gezeigt ist Schall eine Druckschwankung. Die Lautstärke von Schall kann als eine in *pascal* [PA] angegebene Zahl dargestellt werden.

Die Gehörschwelle für ein normal hörendes Ohr beträgt in seinem empfindlichsten Frequenzbereich 20 μ Pa oder 20mikropascal. Das ist 5 000 000 000 mal weniger als der durchschnittliche Luftdruck. Druckschwankungen von 20 μ Pa verursachen im Trommelfell nur eine Amplitude in der Größe eines Atomdurchmessers! Der maximale wahrnehmbare Schalldruck ist fast eine Million mal höher.

Die Verwendung von *pascal* als Einheit für den Schall ist dadurch nicht sehr bequem. Um diese Unbequemlichkeit zu umgehen, wird die Dezibelskala verwendet. Im nächsten Kapitel werden wir uns damit befassen.

Abschnitt 2

Das *dezibel*

In den frühen Tagen der Telefonie trat häufig eine Signalschwächung durch die Verwendung von langen Übertragungskabeln auf.

Diese Abschwächung konnte so stark sein, dass auch die Berechnung des Prozentsatzes der ankommenden Signalstärke bezogen auf die ausgesendete Signalstärke nicht mehr leicht lesbare Zahlen ergab.

Somit wurde ein logarithmischer Maßstab für das Verhältnis zwischen gesendeter und empfangener Signalstärke eingeführt.

Wird ein Logarithmus zur Basis 10 verwendet, so wird der Logarithmus des Verhältnisses zwischen zwei Leistungen als *bel* [B] bezeichnet (benannt nach Alexander Graham Bell, dem Erfinder des Telefons).

Jedoch werden in der Praxis die in *bel* gemessenen Zahlenwerte sehr groß, weswegen wieder eine neue Einheit geschaffen wurde – das *dezibel* [dB].

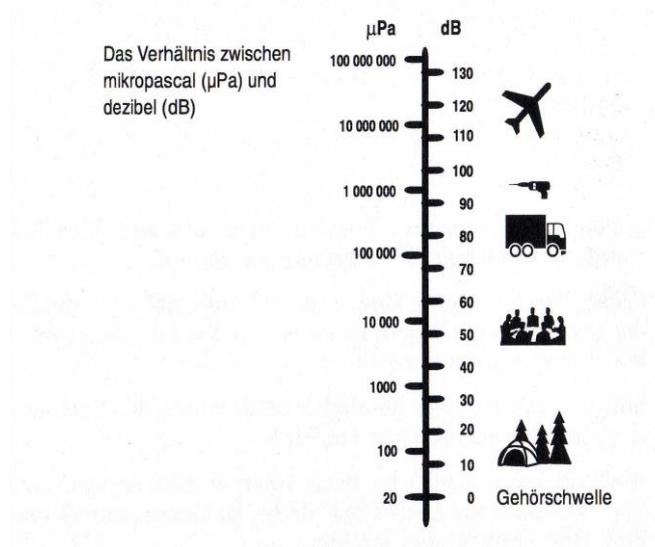
Beim *dezibel* wird, um den Schall in der Luft zu beschreiben, die Gehörschwelle von 20 μPa als Referenzdruck verwendet. Dieser Pegel wird als 0dB definiert. Beim Umsetzen der in *pasca* gemessenen Druckpegel auf dB wird der vorkommende Messbereich von 10 000 000 : 1 auf 140 : 0 reduziert.

Das Problem dabei ist, dass die normalen Rechenregeln hier versagen. Unten ist ein Schaubild aufgeführt, auf dem typische Schalldruckpegel von typischen Quellen dargestellt sind.

Das *dezibel* und das Gehör

Zuvor wurde angedeutet, dass die »normalen« Rechenregeln beim Dezibel nicht mehr funktionieren. Hier werden nun einige Aspekte dieser Erscheinung erörtert.

Da das dB ein Verhältnis ist, ist eine Änderung um xdB überall auf der dB-Skala dieselbe Änderung, ähnlich der Prozentrechnung.



Ein wichtiger Grund, der die Verwendung des dB rechtfertigt, ist die Art und Weise, wie unsere Sinne arbeiten. Unser Gehör funktioniert differentiell (wie die meisten anderen Sinne auch). Änderungen werden eher wahrgenommen als statische Ereignisse.

Dies gilt allerdings nur, solange der wahrgenommene Pegel unterhalb der für das Ohr gefährlichen Schwelle liegt.

Wie viel ist nun ein 1dB? Als allgemeine Regel gilt, dass eine Schalldruckänderung von 1dB vom Gehör gerade noch wahrgenommen werden kann.

Einige gut trainierte Hörer mit ausgezeichnetem Gehör können auch noch Änderungen von bis zu 0,2dB wahrnehmen, aber dies ist natürlich ein Extremfall.

Eine Schalldruckänderung von 3dB ist deutlich vernehmbar.

Physisch betrachtet bedeutet eine Verdopplung des Schalldruckes eine Steigerung des Pegels um 6dB, während eine Verzehnfachung (x10) eine Steigerung um 20dB bedeutet.

Andererseits, wenn ein Schalldruck um 50% reduziert wird (z. B. von 1 auf 0,5 Pa), so wird der Pegel um 6dB vermindert (auch als -6dB-Änderung bezeichnet), und eine Verminderung auf 1/10 entspricht einer Abnahme von 20dB (-20dB-Änderung).

Achtung: Hier ist von Schalldruckpegeln und nicht von Schallleistungspegeln die Rede.

Obwohl ein *dezibel* ein *dezibel* ist, sind die entsprechenden Druck- und Leistungspegel nicht identisch, was wir gleich näher illustrieren werden.

Der Unterschied zwischen Schalldruck und Schalleistung

Beginnen wir mit einem Vergleich: Stellt man einen elektrischen Ofen in einen Raum, schließt ihn ans Netz an und schaltet ihn ein, so wird man feststellen, dass sich der Raum erwärmt.

Die Wärme stammt von der elektrischen Energie, die in Wärmeenergie umgewandelt und vom Ofen abgestrahlt wird. Die erreichbare Temperatur hängt sowohl von der Außentemperatur als auch von den Raumabmessungen und der Güte der Isolierung ab. Zur Vereinfachung wird die Tatsache vernachlässigt, dass sich die Wärme ungleichmäßig im Raum verteilen kann.

Stellt man nun eine Schallquelle in den Raum, so wird eine bestimmte Schalleistung abgestrahlt, die einen Schalldruck aufbaut. Der Schalldruckpegel hängt von Faktoren wie Schallreflexionen an den Zimmerwänden, Schallübertragungen in benachbarte Räume, etc. ab. Auch hier wird wieder eine ungleichmäßige Schallverteilung vernachlässigt.

Die Temperatur in einem Raum kann mit einem Thermometer gemessen werden, der Schalldruckpegel mit einem Pegelmesser.

Wir können mit dem Thermometer nicht die Menge der vom Ofen abgestrahlten Energie ermitteln. Stattdessen wird der elektrische Leistungsbedarf des Ofens ermittelt. Da Elektroöfen einen Wirkungsgrad von annähernd 100 % aufweisen, entspricht die elektrische auch der thermischen Leistung. Die wahrgenommene Temperatur wird eher als Kriterium verwendet als die thermische Leistung (bei Vernachlässigung von Strahlungseffekten).

Analog dazu hören wir eher den Schalldruck als die Schalleistung. Zur Abschätzung von Gehörschädigungen ist der Schalldruck der richtige Parameter.



**Was! 85dB Schalldruck
nur durch Laufen?**

Stimmt! Aber zum Glück können Sie es nicht hören!

Mit ein wenig Mathematik können wir die Druckänderungen am Gehör ermitteln, die durch Laufen entstehen.

Wird keine Höhe überwunden, so kann ein statischer Luftdruck angenommen werden.

Der Druckunterschied zwischen den zwei verschiedenen Höhen Δh ergibt sich aus

$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

wobei ρ = Dichte der Luft (1,2 kg/m³) und g = Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Wir berechnen nun den Gradienten (Änderungsrate des Druckes pro Höheneinheit)

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -\rho g = -1.2 \times 9.81 = -11.7 [N/m^3]$$

Ein Schalldruckpegel von 85dB (quadratischer Mittelwert) entspricht 0,355Pa. Der entsprechende Spitzen-Spitzenwert ist bei sinusförmigen Signalen durch Multiplikation des quadratischen Mittelwertes mit $2\sqrt{2}$ erhältlich, wodurch ein Spitzen-Spitzenwert von 1,006 Pa resultiert. Wird dieser Wert in die obige Gleichung eingesetzt so kann man Δh berechnen:

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\frac{\partial P}{\partial h}} = \frac{1.006}{-11.7} = -0.086 [m]$$

Eine periodische Höhenänderung von 8,6cm verursacht also einen Schalldruckpegel von 85dB! Zum Glück ist die Frequenz zu niedrig, um diesen Schall zu hören, wodurch deutlich wird, daß die Frequenzbegrenzung des Gehörs ein wichtiger Bestandteil der Sinne ist.

Das Dezibel stammt aus den Bereichen der Leistungsmessung, es kann aber durch mathematische Handgriffe auch für Schalldruckpegel verwendet werden.

»Große« und »kleine« Dezibelzahlen

Obwohl für uns der Schalldruck interessant ist, können wir die Schallleistung nicht gänzlich vernachlässigen.

Werden zwei komplett identische Schallquellen in den selben Raum gestellt, so ist nicht der entstehende Schalldruck die Summe der einzelnen Schalldrücke, sondern die gesamte Schallleistung die Summe der einzelnen Schallleistungen.

Eine eingehende Erklärung dieser Erscheinung würde den Rahmen dieser Bedienungsanleitung sprengen.

Man könnte nun meinen, Schallleistungen können dazu verwendet werden, um eine Summe aus einzelnen Schallleistungen in einem gemeinsamen Raum zu ermitteln. Aber wieso funktioniert das nicht auch mit Schalldrücken?

Schallleistung ist proportional dem Quadrat des Schalldruckes. Wird der Schalldruck verdoppelt, so vervierfacht sich die Schallleistung.

Diese Tatsache kann uns helfen, uns nun auch mit den Schallleistungen anzufreunden.

Weiter vorher wurde erwähnt, dass 1dB gleich 1dB sei. Diese Feststellung kann nun verfeinert werden. Eine Schalldruckänderung von +6dB bewirkt einen doppelt so hohen Schalldruckpegel und eine vier mal so große Schallleistung.

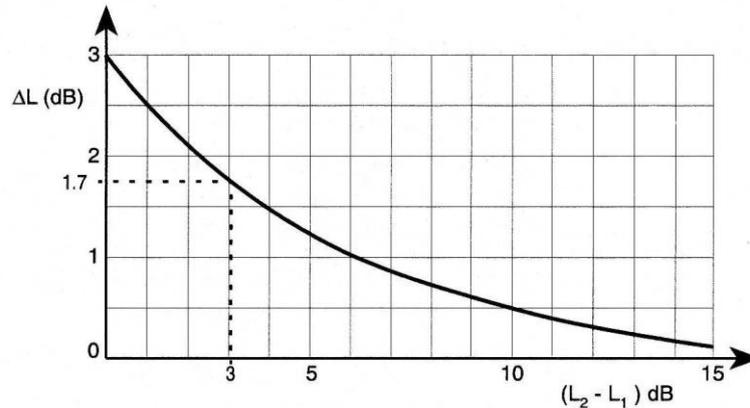
Ein dB Schallleistung zählt somit mehr als ein dB Schalldruck - daher die Überschrift »Große« und »Kleine« *dezibel*.

Addition von Schallquellen

Gleich zu Beginn einer akustischen Messtätigkeit können Situationen entstehen, in denen man Schalldruckpegel addieren muss.

Zum Beispiel ist eine Schallmessung in einer Fabrikhalle durchzuführen, wobei aber nicht alle Maschinen gleichzeitig eingeschaltet werden dürfen. Nach einiger Zeit hat man den Schalldruck von jeder einzelnen Maschine gemessen, nicht jedoch den gesamten Schalldruck.

Wenn Sie ein guter Mathematiker sind, können Sie schon damit beginnen, den gesamten Schalldruck aus den Einzeldrücken zu berechnen. Es gibt allerdings elegantere Methoden, um zum gleichen Ergebnis zu gelangen: Zu diesem Zweck wurde ein spezielles Diagramm angefertigt.



Beispiel:

Die Schalldruckpegel von zwei Maschinen werden gemessen und betragen $L_1 = 85$ und $L_2 = 88$ dB. Die Differenz zwischen beiden Pegeln beträgt $88 - 85 = 3$ dB. Auf der horizontalen Achse ist der Punkt mit 3 dB zu suchen. Nun geht man hinauf, bis die Kurve geschnitten wird, und an dieser Stelle nach links bis zur vertikalen Achse. Ein Wert von ungefähr $\Delta L = 1,7$ dB kann abgelesen werden. Dieser Wert ist zum Pegel der lauterer Maschine zu addieren. Der Summenpegel beträgt somit $88 + 1,7 = 89,7$ dB ≈ 90 dB.

Es wird verwendet, um die Summe aus zwei Schallpegeln zu ermitteln. Das Diagramm kann auch für mehrere Schallquellen verwendet werden, diese sind aber dann immer in zwei und zwei zusammenzufassen. Um z. B. drei Schallquellen zu addieren, sind zunächst nur zwei zusammenzuzählen und das Ergebnis mit der dritten.

Noch einmal zurück zum vorhergehenden Beispiel: Jede Maschine darf nur einmal gemessen werden, sonst ist diese Addition falsch.

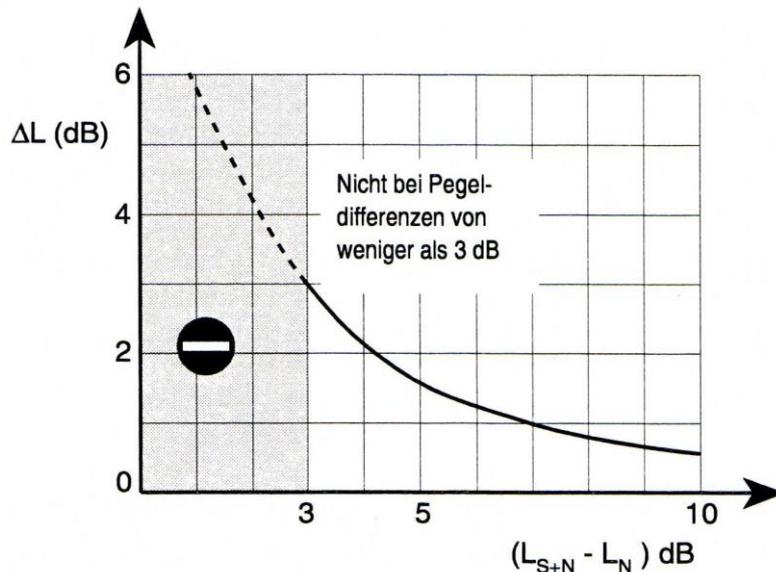
Ein weiteres Problem einer Messung ist die Kompensation des Hintergrundrauschens.

Kompensation des Hintergrundrauschens

Stellen Sie sich vor, Sie messen an einer Maschine. Allerdings machen andere Maschinen soviel Lärm, dass die gewünschte Maschine im allgemeinen Lärm untergeht. Das Messergebnis wird also falsch sein.

Der Schallpegel der gewünschten Quelle muss höher sein, als der des Hintergrundes. Um zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten, ist dazu ein Abstand von 3dB erforderlich. Jedoch ist auch dann eine Korrektur notwendig, um das Hintergrundgeräusch aus dem Messergebnis herauszufiltern, wenn der Signal-Rauschabstand mehr als 3dB beträgt.

Auch hier können Mathematiker das Hintergrundgeräusch herausrechnen, jedoch bietet ein Diagramm eine elegantere Methode:



Beispiel:

Es wird ein Schalldruckpegel L_{S+N} bei laufender Maschine gemessen. Die Maschine wird abgeschaltet, wodurch nun der Pegel des Hintergrundgeräusches L_N gemessen werden kann. Diese Werte betragen z. B. $L_{S+N} = 72 \text{ dB}$ und $L_N = 65 \text{ dB}$. Die Differenz zwischen den beiden Pegeln beträgt $72 - 65 = 7 \text{ dB}$.

Auf der horizontalen Achse ist der Punkt mit 7 dB zu suchen. Nun geht man hinauf, bis die Kurve geschnitten wird, und dann nach links, bis zur vertikalen Achse.

Hier ist ein ΔL_N , von 1 dB ablesbar. Dieser Wert ist vom höchsten Pegel (L_{S+N}) zu subtrahieren, womit der von der Maschine abgestrahlte Pegel berechnet wird ($72 - 1 = 71 \text{ dB}$).

Die Aussage dieses Diagramms ist, dass bei Signal-Rausch-Abständen von mehr als 10 dB die Korrektur geringer als 1 dB und somit vernachlässigbar ist.

Die Gesamtleistung ist gleich der Summe der Einzelleistungen

Man könnte glauben, dass, obwohl die Gesamtleistung gleich der Summe der Einzelleistungen ist, eine Schalleistung auftaucht, die in keiner der Einzelleistungen steckt, sobald die beiden Schallquellen addiert werden.

Woher kommt nun diese Schalleistung?

Angenommen man stellt im vorangehenden Beispiel einen zweiten Ofen in den Raum und bezahlt für die verbrauchte elektrische Leistung. Woher weiß aber das Elektrizitätswerk, dass man zwei Öfen in einem Raum zusammengestellt hat, die gemeinsam mehr Energie liefern, als wenn sie in Einzelräumen stünden?

Das Rechnen mit Pegeln in Dezibel

$$\text{Schalldruckpegel [dB]} = 10 \log (P_m^2/P_0^2)$$

$$\text{Schalldruckpegel [dB]} = 20 \log (P_m/P_0)$$

P_m , ist der Messwert und P_0 die Gehörschwelle von $20 \mu\text{Pa}$. Da das *dezibel* allgemein definiert und mit der Verwendung von $20 \mu\text{Pa}$ als Referenz nicht eingeschränkt wird, wird es auch mit »dB SPL« (Schalldruckpegel, engl. *Sound Pressure Level*) bezeichnet.

Beachtung verdienen die quadrierten Werte in der ersten Zeile. Das hat seine Ursache in der Leistungsdefinition des *dezibel*. Durch mathematische Grundregeln sind die beiden Gleichungen jedoch völlig identisch. Eine kurze Darstellung dieser Tatsache kann dem Text entnommen werden.

Wenn die Maschine nicht abgeschaltet werden kann ...

Oft können Anlagen, an denen gemessen werden soll, nicht abgeschaltet werden. In der Papierindustrie z. B. sind Maschinenstillstände so teuer, dass die Ermittlung des Hintergrundgeräusches nicht in Frage kommt. Was ist nun zu tun?

Eine Möglichkeit ist, alle anderen Maschinen abzuschalten – oder mit anderen Worten, das Hintergrundgeräusch. Die Vorgehensweise ist hier die gleiche wie zuvor, nur dass Hintergrundgeräusch und das Geräusch der zu ermittelnden Maschine bei den Berechnungen den Platz tauschen.

Es muss allerdings betont werden, dass die Kompensation des Hintergrundgeräusches nur bei Messungen an Maschinen relevant ist. Soll der Lärm ermittelt werden, dem ein Mitarbeiter ausgesetzt ist, ist immer die Summe aller Maschinen zu messen. Eine Subtraktion des Hintergrundgeräusches ist nicht durchzuführen. Das Gehör kann außerdem das Hintergrundgeräusch vom Maschinengeräusch nicht trennen.

Abschnitt 3

Bewertungen

Wurde bisher eine messtechnische Betrachtung des Schalls vorgenommen, so muss nun ein Bezug zum menschlichen Gehör und die damit verbundenen Frequenzabhängigkeiten hergestellt werden.

In *Was ist Schall* wurde der für den Menschen hörbare Bereich des Schalls mit 20Hz bis 20kHz angegeben. Genaugenommen trifft das nur auf junge und gesunde Menschen zu, denn die Fähigkeit, hohe Frequenzen wahrzunehmen, nimmt mit dem Alter ab (Presbycusis).

In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass das menschliche Gehör hinsichtlich der Frequenz nicht linear ist. Auch wenn Signale gleiche Pegel aufweisen, hören wir sie bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlich laut. Das Gehör ist also frequenzabhängig.

Und nicht nur das, die Frequenzabhängigkeit ist zudem noch pegelabhängig. Um dieses ziemlich komplexe Phänomen zu illustrieren werden die Kurven gleicher Lautheit oder *Fletcher-Munson-Kurven* (benannt nach den beiden Entdeckern) verwendet.

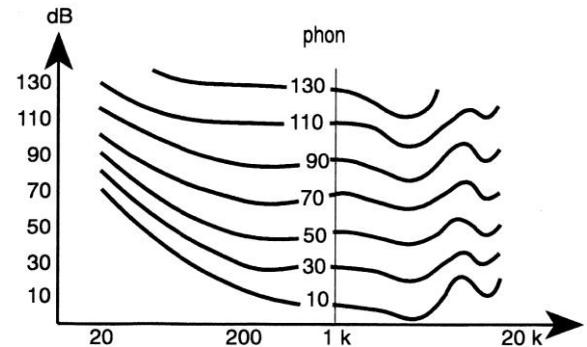
Die Kurven zeigen, dass die empfundene Lautheit sowohl eine Funktion der Frequenz als auch eine Funktion des Pegels ist. Bei manchen Frequenzen muss die Lautstärke für einen Ton erhöht werden, während er bei anderen Frequenzen abgeschwächt werden muss, damit er gleich laut einem 1kHz-Ton erscheint.

Auf dem obersten Kurvenbild der nächsten Seite wurden alle Kurven invertiert. Daraus ist ersichtlich, in welchem Ausmaß das menschliche Gehör manche Teile des hörbaren Frequenzbereichs dämpft, während andere Teile verstärkt werden.

Das menschliche Hörvermögen ist im niederfrequenten Bassbereich eingeschränkt - obwohl dieser Eindruck in einer Diskothek nicht entsteht.

Die Kurven gleicher Lautheit bilden die Gehörcharakteristik des Menschen nach und geben darüber Auskunft, um wie viel ein Schallpegel geändert werden muss, um bei Veränderung der Frequenz das gleiche Lautheitsempfinden beizubehalten...

Die hier verwendete Einheit ist 1 *phon*. Bei 1 kHz ist die *phon*- und dB-Angabe des Schalldrucks identisch. Mit veränderter Frequenz ändert sich jedoch der Zahlenwert in *phon*, während der dB-Zahlenwert gleich bleibt...



Der eher empfindlichere Frequenzbereich des Gehörs ist jener Bereich, in dem die Sprache ihre Hauptfrequenzanteile aufweist.

Die bei einem *p* oder *t* auftretenden Geräusche haben wesentliche Spektralanteile innerhalb des empfindlichsten Frequenzbereichs, wodurch eine Unterscheidung leicht fällt.

Die Fähigkeit, Schall im empfindlichen Frequenzbereich, der sich ungefähr zwischen 1 und einigen wenigen kHz befindet, bevorzugt wahrzunehmen, ist für die sprachliche Kommunikation von Bedeutung.

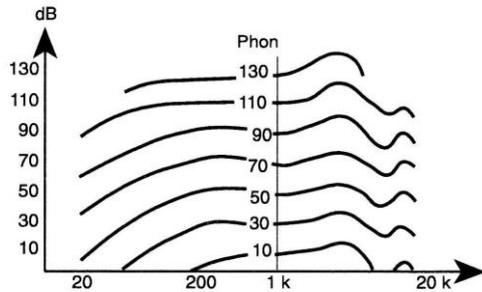
Wenn man nun bedenkt, dass dieser Frequenzbereich auch gleichzeitig der verwundbarste Teil des menschlichen Gehörs bei zu hohen Schallpegeln ist, wird die Wichtigkeit der Schallmesstechnik zum Schutz des Gehörs erkennbar.

Ein Schallpegelmesser, der Schall so wahrnimmt, wie der Mensch

Ein Schallpegelmesser (abgekürzt: SPM aus Schallpegelmesser oder SLM, aus engl. Sound Level Meter) muss so beschaffen sein, dass er den Schall so aufnimmt, wie er vom menschlichen Gehör wahrgenommen wird.

Ein »idealer« Schallpegelmesser misst alle Teile des hörbaren Frequenzbereichs gleich, weder betont noch schwächt er Teile des Spektrums ab. In diesem Fall spricht man von einer linearen Frequenzbewertung. Um jedoch gehör richtig zu messen, kann ein »idealer« Schallpegelmesser nicht verwendet werden.

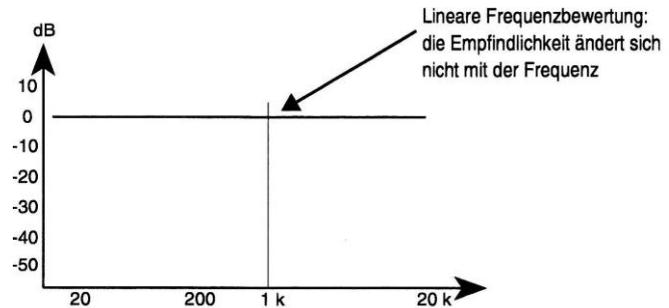
Werden die Kurven gleicher Lautheit invertiert, so wird das Vermögen des Ohrs, bestimmte Frequenzbereiche abzuschwächen und andere zu betonen, ersichtlich.



Schallpegelmessgeräte müssen dem menschlichen Gehör angepasst werden. Ein »ideales« Schallpegelmessgerät führt weder eine Abschwächung noch eine Betonung bestimmter Frequenzbereiche durch...

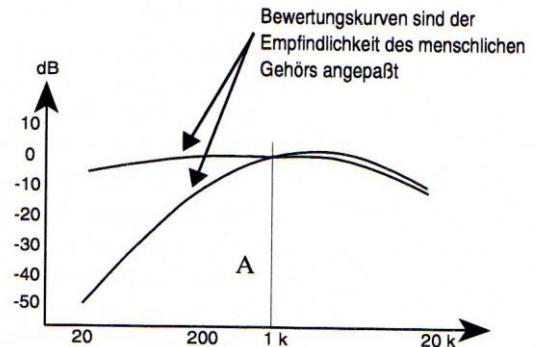
...diese Charakteristik weisen normalerweise Messgeräte mit linearer Schallbewertung auf, d. h. kein Frequenzbereich wird verändert...

...jedoch stimmen die Messergebnisse von »idealen« Messgeräten nur wenig mit der vom Menschen empfundenen Lautheit überein...



...deswegen muss ein Schallpegelmesser an das Gehör angepasst werden.

Das geschieht, indem einige Frequenzbereiche mehr gewichtet werden als andere - sehr ähnlich der Funktionsweise des menschlichen Gehörs. Diese Anpassung wird durch elektronische Schaltkreise verwirklicht und wird als Frequenzbewertung bezeichnet. Ursprünglich waren vier Bewertungsfunktionen verbreitet - die A-, B-, C- und D-Bewertung, heute sind nur mehr die A- und C-Bewertung in Gebrauch.



Man muss eine Annäherung an das menschliche Gehör erreichen. Die Nichtlinearität des Gehörs kann auch als Betonung einiger Teile des Spektrums gegenüber anderen angesehen werden.

Elektronische Schaltkreise können dies mit einer Schallbewertungsfunktion sehr gut bewältigen. Ein mit einer Schallbewertung ausgestatteter Schallpegelmesser kann gehörrichtig messen.

Um Messungen vergleichbar zu machen, sind diese Annäherungen - auch Bewertungskurven genannt - standardisiert.

Ursprünglich gab es vier verschiedene Bewertungskurven. Diese wurden als A-, B-, C- und D-Bewertung bezeichnet. Analog dazu werden mit A-Bewertung gewichtete Messungen als A-bewertete Messungen bezeichnet.

Die Bewertungskurven

Warum gibt es eigentlich vier verschiedene Bewertungskurven? Um diese Frage zu beantworten, müssen die Gründe für deren Entstehung angeführt werden.

- Die A-Bewertung entspricht ungefähr der Kurve gleicher Lautheit für 40phon.
- Die B-Bewertung folgt dem Kurvenverlauf von 70phon.
- Die C-Bewertung entspricht der Kurve gleicher Lautheit für 100phon.
- Die D-Bewertung ist für einzelne Ereignisse, wie z. B. ein einzelnes Flugzeug, gedacht.

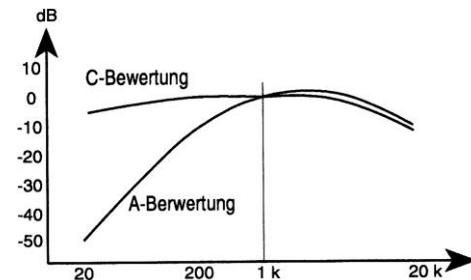
Es wurden noch weitere Bewertungskurven geschaffen, die aber keine weitere Verbreitung fanden.

Die Kurven gleicher Lautheit entstanden nach Messungen mit reinen Sinustönen. Jedoch stellte sich bald heraus, dass, außer der A-Bewertung, keine der anderen Bewertungen mit der Empfindung für in Wirklichkeit vorkommende komplexe Schallereignisse korreliert. Somit fand bis vor kurzer Zeit außer der A-Bewertung keine der anderen Bewertungen Verwendung.

Erst in jüngerer Zeit wurde die C-Bewertung wieder ins Leben gerufen - nicht, weil sich an ihrer Diskrepanz mit der Wirklichkeit inzwischen etwas geändert hätte, sondern wegen ihrer Kurvenform. Der Unterschied zwischen einem mit A- und einem mit C-Bewertung gemessenen Schalldruckpegel verrät einiges über die spektralen Eigenheiten des gemessenen Schalls. Außerdem bietet die C-Bewertung nahezu eine Annäherung an eine frequenzbegrenzte Linearmessung.

Der Unterschied zwischen A- und C-bewerteten Messungen liefert Informationen über die spektralen Eigenschaften des gemessenen Schalls...

...stellen Sie sich den Pegelunterschied $C - A$ vor. Wenn $C - A > 0$ ist, wird das Spektrum durch niederfrequenten Schall dominiert, einfach deswegen, weil die C-Bewertung im Bereich unter 1 kHz nicht so stark abschwächt, wie die A-Bewertung. Tritt jedoch das Ergebnis $C - A < 0$ ein, wird das Spektrum durch hochfrequenten Schall beeinflusst. Je negativer dieses Ergebnis ist, desto höherfrequent ist der dominante Frequenzbereich. Ist das Ergebnis nahezu 0, so liegt der dominierende Anteil um 1 kHz



Wieso ist das von Bedeutung? Nun, wenn an einer Klangbildverbesserung gearbeitet werden soll, so hängen die Messungen wesentlich von den spektralen Eigenheiten des Schalls ab. Hochfrequenter Schall kann viel leichter eingedämmt werden als niederfrequenter, und niemand will mehr Geld in Schallschutzmaßnahmen investieren, als unbedingt notwendig.

Andererseits werden Maßnahmen, die auf eine Verbesserung der Situation bei hochfrequentem Schall abzielen, kaum bei einer niederfrequenten Lärmquelle wirksam sein.

Um mit dieser Problematik zurechtzukommen, ist eine Frequenzanalyse mit engeren Filtern als Oktavbandfiltern notwendig, normalerweise reichen Terzbandfilter aus. Eine genauere Darstellung dieses

Bereiches der Schallmesstechnik würde nun den Rahmen der Bedienungsanleitung sprengen. Zur Abrundung dieses Kapitels soll aber noch die Tatsache herausgestrichen werden, dass durch Erfassung des Unterschiedes von A- und C-Bewertung eine Art Frequenzanalyse erfolgt. Die Abbildung soll hier zusätzliche Informationen liefern.

Achtung: Die Bezeichnung dB(A) wird allgemein verwendet, um zu signalisieren, dass ein Messergebnis A-bewertet ist. Analog dazu wird die Bezeichnung dB(C) verwendet.

Abschnitt 4

Ermittlung des Schallpegels

Schall ist meistens ziemlich schwankend. Daraus entstehen zunächst zwei Probleme: Nämlich, wie kann man diese Schwankungen so genau wie möglich erfassen, und wie kann man zu einem Messergebnis kommen, das z. B. »58dB« lautet.

Die Praxis besteht immer aus Kompromissen.

Es ist nach einer qualitativ hochwertigen und den technischen Anforderungen genügenden Lösung zu suchen, d. h. die durch die eingesetzte Technologie und Methodik verursachten Fehler und Unzulänglichkeiten sollen hinsichtlich praktischer, wirtschaftlicher und technischer Überlegungen so gering als möglich sein.

Stellen Sie sich einen Schallpegelmesser mit einer analogen Anzeige vor (Zeiger oder Messbalken). Wenn nun der Pegel zu großen Schwankungen unterworfen ist, ist es unmöglich, einen Messwert abzulesen. Ist eine Zeigerbedämpfung eingebaut, besteht wiederum das Risiko, rasche Messwertänderungen nicht erfassen zu können.

Es liegt auf der Hand, dass zwei unterschiedlich bedämpfte Zeigermessgeräte ein und dasselbe Schallsignal unterschiedlich anzeigen. Schallmessungen verlieren ihre Eindeutigkeit - eine der wichtigsten Forderungen überhaupt.

Um dies zu ermöglichen, wurden die Ansprechgeschwindigkeiten der Instrumente standardisiert.

Warum ist es so schwierig, am Telefon zu buchstabieren?

Telefone weisen einen Frequenzbereich von 200 bis 3000 Hz auf. Über 3kHz kommt nur sehr wenig Information durch. Das bedeutet, dass ein sehr wesentlicher Frequenzbereich fehlt, weswegen Schwierigkeiten beim Buchstabieren erklärt werden können, wenn nicht das phonetische Alphabet (»Anton«, »Berta«, »Cäsar«,...) verwendet wird.

Ansprechgeschwindigkeit der Anzeige

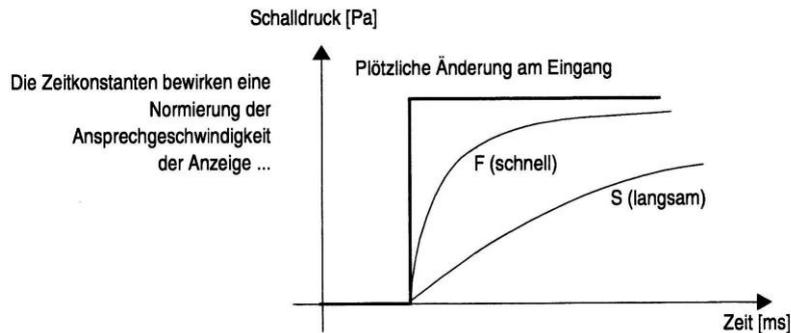
Zwei Ansprechgeschwindigkeiten wurden standardisiert. Diese sind F (schnell für engl. *fast*) und S (langsam für engl. *slow*).

Ein Schallpegelmessgerät ist immer mit einer Anzeigevorrichtung ausgestattet. Diese ermöglicht die Umwandlung des gemessenen Schalldruckes in eine Pegelangabe (einer Zahl in dB über der Gehörschwelle von 20 μPa).

Als Ansprechgeschwindigkeit der Anzeige versteht man die maximale Änderungsgeschwindigkeit des angezeigten Wertes bei einer schnellen Änderung des Messwertes. Das richtige Wort für diese Eigenschaft ist Zeitkonstante.

Ändert sich der Messwert (= Eingangssignal der Anzeige) von 0 auf einen bestimmten Wert, so gibt die Zeitkonstante Auskunft, in welcher Zeit 63 % des Messwertes angezeigt werden. Warum 63 %? Um nicht zu tief in die Materie einzudringen, sei hier nur gesagt, dass dies mit der Zahl e zusammenhängt, welche die Basis des natürlichen Logarithmus ist. Bemerkenswert an dieser Tatsache ist, dass, nachdem 63% des Messwertes angezeigt werden, es wieder die Zeit der Zeitkonstante benötigt, um 63 % des verbleibenden Rests anzuzeigen.

Die Zeitkonstante F beträgt 125 ms und ermöglicht eine rasch reagierende Anzeige.



Die Zeitkonstante S andererseits ist 8-mal so langsam, nämlich 1 Sekunde. Mit dieser Anzeige können auf Zeiger- und Messbalkengeräten rasche Schwankungen ausgeglichen werden. Dadurch werden

Messwertablesungen möglich, die bei der Zeitkonstante F und bei stark schwankenden Signalen ein Ablesen erschweren.

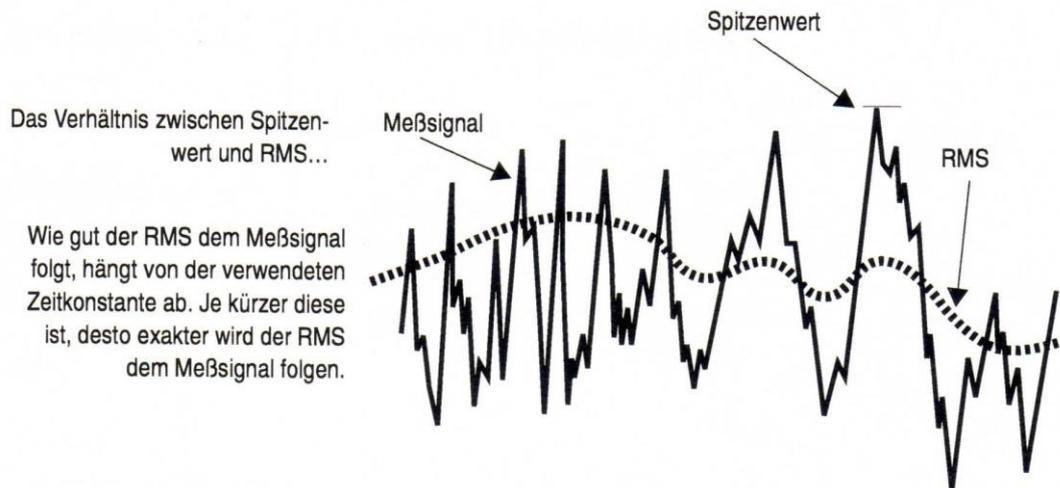
Bei modernen Schallpegelmessgeräten mit digitaler Ziffernanzeige wird die Anzeige nur einmal pro Sekunde verändert, und stellt somit den maximalen Schallpegel der letzten Sekunde unter der eingestellten Zeitkonstante dar.

RMS, Impulse und Peak

Der Bezeichnung RMS wird man im Rahmen der Messtätigkeit oft begegnen. Sie bedeutet Quadratischer Mittelwert (engl. *Root Mean Square*) und ist ein spezieller mathematischer Mittelwert, der in direktem Zusammenhang zum Energiegehalt des gemessenen Schalls gebracht werden kann.

Wie wir noch später sehen werden, ist der Energiegehalt eines Schalls ein wesentlicher Bestandteil der Abschätzung einer Gesundheitsgefährdung.

Schall kann aber auch impulshaltig sein, und dann bewirkt eine RMS-Messung mit den Zeitkonstanten F und S vom empfundenen Lärm abweichende Messergebnisse.



Um auch diesem Aspekt gerecht zu werden, gibt es eine dritte Zeitkonstante, die mit I (*Impulse*) bezeichnet ist. Diese Zeitkonstante beträgt 35 ms und ist ausreichend kurz, um transiente (sich schnell ändernde) Schallereignisse ähnlich dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen messen und anzeigen zu können. Um das Ablesen von Messwerten zu erleichtern, beträgt die Zeitkonstante des Abfalles 1,5 Sekunden.

Vorher wurde festgestellt, dass die empfundene Lautheit eine Funktion von Frequenz und Pegel ist. Um die Sache noch etwas zu komplizieren, ist die empfundene Lautheit zusätzlich auch noch eine Funktion der Schalldauer. Kurze Emissionen werden als weniger laut empfunden als lange und stetige Emissionen mit demselben Pegel.

Das heißt nicht, dass für kurze Schallimpulse auch das Gesundheitsrisiko von Lärm abnimmt. Aus diesem Grunde weisen Präzisionsmessinstrumente, wie z. B. der Schallpegelmesser 131, die Möglichkeit auf, den Spitzenwert (engl. *peak*) eines Geräusches unabhängig von dessen Dauer zu messen und anzuzeigen. Um eine Ablesung des Spitzenwertes zu ermöglichen, haben die Messgeräte üblicherweise einen Spitzenwertspeicher.

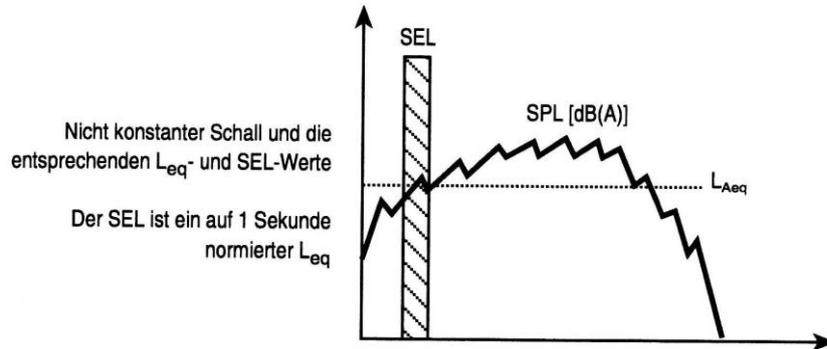
Energetische Parameter L_{eq} und SEL

Schall stellt eine Form von Energie dar. Das Gesundheitsrisiko hängt nicht nur vom Pegel, sondern auch von der Energie des Schalls ab. Bei gegebenem Schallpegel steigt die Energie mit der Einwirkungsdauer.

Um nun eine gehörschädigende Wirkung abschätzen zu können, ist sowohl der Schallpegel als auch die Einwirkungsdauer zu berücksichtigen. Ab einem bestimmten Pegel jedoch ist die Einwirkungsdauer nicht mehr relevant, eine Gehörschädigung tritt dann sofort ein.

Um das Verständnis für Messwerte zu erhöhen, ist man um Datenreduktion bemüht. Schafft man es, die Daten auf ein oder zwei Zahlenangaben zu reduzieren, ohne dabei den Hinweis auf Gehörschädigungen oder bei kleineren Pegeln das Maß an Belästigung außer Acht zu lassen, so war dieses Bestreben erfolgreich.

Besteht nun die Möglichkeit, alles bisher gehörte zu kombinieren?



Natürlich lautet die Antwort ja, denn wir führen nun den energieäquivalenten Dauerschallpegel, kurz L_{eq} ein. Der L_{eq} weist die gleiche Energie und folglich das gleiche Gehörschädigungspotential auf wie der schwankende Schallpegel.

Das klingt ähnlich dem RMS, aber obwohl beide ein äquivalentes konstantes Signal darstellen, das den gleichen Energiebetrag des schwankenden Signals aufweist, können sie nicht miteinander vertauscht werden. Der L_{eq} drückt das lineare Energiemittel aus, während der RMS einen bewerteten Durchschnittswert darstellt, in dem die letzten Ereignisse mehr Gewicht haben als die älteren.

Messung des L_{eq}

Bei konstanten Schallpegeln ist die Ermittlung des L_{eq} nicht schwierig, er wird dem Schalldruckpegel sehr ähnlich sein. Sogar, wenn sich der Schall schrittweise ändert, ist es noch immer einfach, den L_{eq} auszurechnen, vorausgesetzt man misst mit einer Stoppuhr die Zeitspanne, die der Schall auf einem bestimmten Pegel verweilt. Da der L_{eq} einen Mittelwert darstellt, kann er aus den Einzelpegeln und ihrer Einwirkungsdauer berechnet werden.

In den meisten Fällen ändert sich ein Schallsignal jedoch zufällig, wodurch eine Abschätzung des L_{eq} unmöglich wird.

In solchen Fällen müssen integrierende Schallpegelmessgeräte verwendet werden. Der Schallpegelmesser 131 ist ein derartiges Gerät, mit dem der L_{eq} , über eine gewünschte Zeitspanne automatisch berechnet werden kann. Mit der Option *Pegelschreiber* besteht sogar die Möglichkeit, den L_{eq} zu sampeln (den Zeitverlauf aufzunehmen).

Der Schalleinwirkungspegel SEL

Der L_{eq} , ist nicht der einzige Pegel, mit dem der Energiegehalt bestimmt werden kann. Ein dazu alternativer Parameter ist der Schalleinwirkungspegel, kurz SEL (nach engl. Single Event Exposure Level).

Der SEL ist als jener konstanter und eine Sekunde lang dauernder Pegel definiert, der denselben Energiegehalt aufweist wie das Messsignal.

Man könnte den SEL auch als den auf eine Sekunde normierten L_{eq} , bezeichnen.

Noch einige Ergänzungen

- L_A bedeutet A-bewerteter Schalldruckpegel
- $L_{A,eq,T}$ bedeutet A-bewerteter L_{eq}
- $L_{A,eq,T,i}$ bedeutet I- und A-bewerteter L_{eq}
- L_{AE} bedeutet A-bewerteter SEL
- Oft wird dB (SPL) verwendet, um die Schall-dB von von »anderen« dBs zu unterscheiden (SPL ... engl. Sound Pressure Level).

SEL-Messungen werden oft verwendet, um die Energie eines einzelnen Schallereignisses zu beschreiben, wie z. B. die Vorbeifahrt von Fahrzeugen oder ein vorbeifliegendes Flugzeug. Der Vorteil von SEL-Messungen ist, dass sie durch ihre Normierung auf 1 Sekunde vergleichbar werden. Der L_{eq} liefert den energieäquivalenten Pegel, er achtet nicht auf Pegel und Einwirkungsdauer des Messsignals.

Wenn zum Beispiel ein Schalldruckpegel von 90dB während 1% der Messdauer gemessen wurde, während es in der restlichen Zeit so still war, dass man eine Stecknadel hätte fallen hören können, so hätte man einen L_{eq} von 70dB gemessen. Dieses Ergebnis ist klarerweise keine befriedigende Beschreibung der akustischen Situation.

(Im Beispiel vorhin würden wir mit dem Schallpegelmesser wohl den L_{eq} messen, wir würden aber zusätzlich den maximalen SPL-Pegel ermitteln und eine Geräuschstatistik durch Berechnung der Prozentanteile durchführen – siehe auch *Umgebungslärm* auf Seite 42.

Was ist RMS?

Die Spannung im Stromnetz beträgt 220V bei 50Hz. Diese Wechselspannung stellt Energie dar, die man z. B. für Beleuchtung verwenden kann. Die Energiemenge wiederum hängt von der entnommenen Strommenge ab. Man kann für denselben Zweck auch eine Gleichspannung verwenden, d. h. der Energiebegriff ist für beide gleich. Der Begriff RMS sagt aus, wie hoch bei einer gegebenen Situation der Wechselstrom sein muss, um dieselbe Energiemenge zu liefern wie ein Gleichstrom.

Definition des L_{eq}

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{p_0^2} dt$$

wobei T die Dauer, $p(t)$ der momentane, bewertete Schalldruck und p_0 der Referenzdruck ist.

Abschnitt 5

Das Schallpegelmessgerät

Ein Schallpegelmessgerät soll auf Schall ähnlich wie das menschliche Gehör reagieren und einen objektiven, reproduzierbaren Messwert des Schalldruckpegels ergeben. Wie wir in den vorangegangenen Kapiteln gesehen haben, ist eine Begrenzung des Frequenzbereichs auf den hörbaren Bereich, eine Frequenzbewertung, die Verwendung von Zeitkonstanten und die Berechnung von energetischen Mittelwerten notwendig.

Die Mikrofonkapsel wandelt das Schalldrucksignal in ein entsprechendes elektrisches Signal um, das sich analog zum Schallsignal verhält (deshalb ist von Analogsignalen und Analogsignalverarbeitung die Rede).

In Präzisionsmessgeräten - z. B. dem Schallpegelmessgerät 118 oder 131 - werden Kondensatormikrophone verwendet, die Präzision mit Stabilität und Zuverlässigkeit vereinen. Das Ausgangssignal der Mikrophone ist ziemlich klein und muss im Vorverstärker verstärkt werden, bevor eine Weiterverarbeitung erfolgen kann.

Die Dynamik des Schalls – der Abstand zwischen dem niedrigsten und dem höchsten auftretenden Schalldruckpegel – ist oft größer als die Dynamik des Schallpegelmessgerätes. Sie kann 140dB oder mehr betragen.

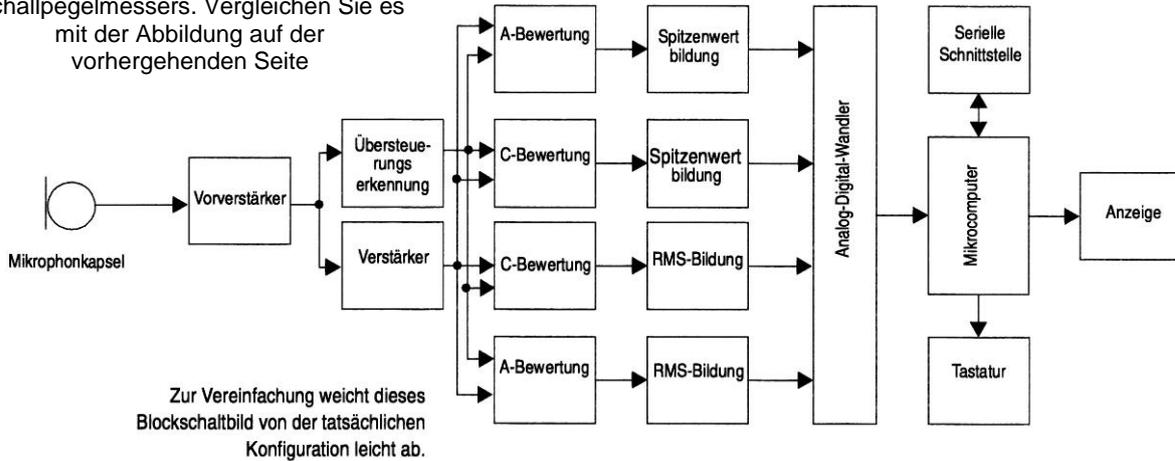
Die Messgeräte Typ 118 und 131 erfassen den Gesamtdynamikbereich in einem einzigen Messbereich, d. h. eine Umschaltung zwischen zwei Messbereichen ist bei diesen modernen Messgeräten nicht mehr notwendig.



Der Schallpegelmesser Typ 131 misst gleichzeitig die A- und C-bewerteten Spitzen- und RMS-Werte. Dafür benötigt es A- und C-Bewertungsfilter sowie Spitzenwert- und RMS-Detektoren. Zur Vereinfachung weicht die folgende Graphik unten etwas von der tatsächlichen Konfiguration ab.

Wenn die RMS- und Spitzenwerte vorliegen, werden sie in einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Die Pegelwerte liegen als Digitalzahlen vor, und können vom Mikro-Computer verarbeitet werden. Dieser steuert auch Anzeige, ermittelt Dezibelzahlen und macht Rechenoperationen, wie z. B. die Ermittlung des L_{eq} . Auch die Zeitkonstanten werden im Mikrocomputer gebildet.

Funktionelles Blockschaltbild eines Schallpegelmessers. Vergleichen Sie es mit der Abbildung auf der vorhergehenden Seite



Abschnitt 6

Kalibrieren

Zu Beginn von akustischen Messungen muss man sich vergewissern, dass der gemessene dem tatsächlichen Schalldruckpegel entspricht. Der Vorgang, mit dem man die Richtigkeit der Messung überprüft, wird Kalibrieren genannt.

Die Verwendung eines Kalibrators geht in jene Zeiten zurück, als es noch einfacher war, einen stabilen Schalldruck zu entwickeln, als ein stabiles Messgerät. Glücklicherweise ist das heute nicht mehr der Fall. Messgeräte können heute genauso stabil erzeugt werden, wie Kalibratoren. Hingegen sind Mikrophone hoch empfindlich und können bei Unachtsamkeit leicht beschädigt werden.

Kalibrieren ist somit primär eine Funktionsprüfung für das Mikrophon als auch eine Justierung der Empfindlichkeit des Schallpegelmessgerätes.

Wie schon öfters erwähnt sind für reproduzierbare Messergebnisse standardisierte Messverfahren notwendig. Man muss deshalb entsprechend den zu verwendenden Normen vorgehen.

Einige Normen schreiben ein Kalibrieren vor und nach der Messung vor. Somit ist sichergestellt, dass alle Messdaten richtig aufgenommen wurden, und dass sich beim Gerät während der Messung nichts geändert hat.

Der Kalibriervorgang

Um einen Schallpegelmesser zu kalibrieren, verwenden wir einen akustischen Kalibrator – wie z. B. den Norsonic-Kalibrator 1251. Ein akustischer Kalibrator erzeugt ein Schallsignal bekannten Pegels.

Zeigt das Messgerät beim Kalibrierton einen falschen Messwert an, ist seine Empfindlichkeit solange zu verändern, bis der Sollwert angezeigt wird. Erst dann ist das Messgerät kalibriert.

Weicht der angezeigte Wert stark vom Sollwert ab und/oder lässt er sich nicht mehr richtig einstellen, ist eine Überprüfung des Messgerätes notwendig.

Genauigkeit und Toleranzen

Zeigt das Messgerät beim Kalibriertonen einen falschen Messwert an, ist seine Empfindlichkeit solange zu verändern, bis der Sollwert angezeigt wird. Erst dann ist das Messgerät kalibriert.

Weicht der angezeigte Wert stark vom Sollwert ab und/oder lässt er sich nicht mehr richtig einstellen, ist eine Überprüfung des Messgerätes notwendig.

Die durch DIN EN 60942 erlaubten Toleranzen in dB		
Klasse	Kalibrator	Messgerät
1	0,3	1,1
2	0,5	1,9



Kalibrator Typ Nor1251



Der Kalibrator wurde am
Mikrofon befestigt...

... und der Pegelmesser wird
solange eingestellt, bis der
richtige Schalldruckpegel
angezeigt wird.

Messgeräteklassen

Nach DIN EN 61672 werden Schallpegelmessgeräte entsprechend ihrer Genauigkeit in Klassen eingeteilt. Diese Klassen sind 1 und 2 wobei 1 die genaueste - d. h. mit den engsten Toleranzen - und 2 die ungenaueste Klasse ist.

Nationale und internationale Normen schreiben für bestimmte Messaufgaben eine Mindestgeräteklasse vor. Geräte der Klasse 2 werden z. B. nur für reine Überblicksmessungen eingesetzt werden.

Das Problem von Messtoleranzen betrifft nicht nur das Messgerät selbst, sondern auch den Kalibrator. Kalibratoren sind hinsichtlich ihrer Pegelgenauigkeit und -Stabilität in Klassen eingeteilt worden. Damit wurde sichergestellt, dass mit Präzisionsmessgeräten durchgeführte Messungen nicht durch ungenaue Kalibratoren unbrauchbar werden.

Tip:

Als allgemeine Regel soll die Genauigkeitsklasse des Kalibrators mit der des Messgerätes übereinstimmen, z. B. ein Klasse-I-Kalibrator für ein Klasse-I-Messgerät. Natürlich kann ein Klasse-1 -Kalibrator auch für ein Klasse-2-Messgerät verwendet werden.

Abschnitt 7

Raumakustik - Messungen an Maschinen

Der gemessene Schalldruck hängt sehr oft von den Umgebungsbedingungen ab, in denen sich die Schallquelle und das Messgerät befinden. Mit anderen Worten: Der Raum, in dem gemessen wird, beeinflusst das Messergebnis. Manchmal, aber nicht immer, ist das unerwünscht.

Ein Grundwissen über Raumakustik ist somit erforderlich, um grobe Fehler zu vermeiden.

Beginnen wir diesen Exkurs in die Raumakustik mit der Betrachtung von zwei Extremsituationen – dem reflexionsfreien Raum und dessen Gegenteil, dem Hallraum.

Reflexionsfreie Räume

In reflexionsfreien Räumen sind Wände, Decke und Boden mit einem hoch absorbierenden Material ausgekleidet, das Reflexionen verhindert.

Der hier gemessene Schalldruckpegel ist, egal aus welcher Richtung er kommt, unbeeinflusst von Reflexionen.

Durch das Fehlen von Reflexionen ist die akustische Situation in einem reflexionsfreien Raum dem Freifeld ähnlich.

Eine typische Anwendung von reflexionsfreien Räumen ist die Bestimmung der Abstrahlcharakteristik von Schallquellen.

Hallräume

Hallräume stellen das genaue Gegenteil von reflexionsfreien Räumen dar. Ein Hallraum hat schallharte, hochgradig reflektierende Wände, Decke und Boden, um möglichst viel Schall zu reflektieren. Solche Räume haben oft nicht parallele Oberflächen, um stehende Wellen zu vermeiden und ein möglichst diffuses Schallfeld zu erzeugen.

Ein typisches Anwendungsbeispiel für einen Hallraum ist die Bestimmung der Gesamtschalleistung einer Schallquelle. Durch die Reflexionen im Hallraum ist der gemessene Pegel an jedem Ort ein Durchschnittspegel.

Hallräume sind in der Konstruktion billiger als reflexionsfreie Räume, weswegen sie oft bei der Überprüfung von Maschinenlärm zur Anwendung kommen.

Die Mehrzahl der Räume ist eine Mischung von reflexionsfreiem Raum und Hallraum. Man findet meist Elemente der beiden Extremsituationen vor.

Wir werden nun etwas mehr in die Materie der Schallausbreitung eindringen.

Schallausbreitung

Schallausbreitung in der Luft hat viele Ähnlichkeiten mit den Wellen auf einem Teich. Wellen breiten sich gleichmäßig in alle Richtungen aus. Sieht man genau hin, wird man bemerken, dass die Wellenamplitude mit der Entfernung zu ihrem Ursprung abnimmt.

Schall, der sich unter Freifeldbedingungen frei in alle Richtungen ausbreitet, gehorcht dem $1/r^2$ -Gesetz, das besagt, dass der Schalldruckpegel mit jeder Verdopplung der Entfernung von der Quelle um 6 dB abnimmt.

Befindet sich in Ausbreitungsrichtung ein Hindernis – wie z. B. eine Wand – so wird ein Teil des Schalls reflektiert, ein weiterer Teil wird von dem Hindernis absorbiert, und der verbleibende Rest wird durch das Hindernis hindurch übertragen.

Das Verhältnis zwischen Reflexion, Absorption und Übertragung hängt von den Größenverhältnissen des Hindernisses, von seinem Material, von der geometrischen Form und zum erheblichen Teil von der Wellenlänge des Schalls ab. Das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Frequenz wurde bereits im Kapitel "Was ist Schall?" näher erläutert.

Als Faustregel gilt, dass ein Hindernis größer als die Wellenlänge des Schalls sein muss, um die Schallausbreitung signifikant zu stören.

Werden Hindernisse zur Schalldämmung verwendet, so ist die Größe des »aktiven« Hindernisses (mit Abmessungen größer als die Wellenlänge) mindestens zu verdoppeln, wenn die Frequenz halbiert wird.

Aus dem Beispiel werden Sie nun erkennen, warum die Dämmung von niederfrequentem Schall so viel schwieriger ist, als die von hochfrequentem Schall.

Beispiel:

Bei 15 kHz beträgt die Wellenlänge von Schall 2,3 cm. Der Durchmesser eines ½“ Mikrophons beträgt 1,27 cm. Daraus wird ersichtlich, dass auch kleine Gegenstände, wie das Mikrophon eines Schallpegelmessers, das Schallfeld beeinflussen. Aus diesem Grund sind die Schallpegelmesser Nor118 und Nor131 mit einem Freifeldmikrophon ausgestattet, das seine Gegenwart im Schallfeld kompensiert und dadurch fehlerhafte Ergebnisse vermeidet.

Die Realität: Normale Räume

Die meisten Räume sind weder völlig reflexionsfrei noch völlig schallhart.

Deswegen ist bei Messungen in Räumen Vorsicht geboten.

Stellen Sie sich vor, Sie wollen Messungen an einer Maschine durchführen, und wollen ziemlich weit weg von der Maschine messen. Reflexionen von Wänden und nahen Objekten werden das Messergebnis verfälschen. Der Schalldruck, der gemessen wird, ist wirklich der dort vorhandene, allerdings beschreibt er nicht die akustische Emission der Maschine. Da in diesem Bereich Reflexionen dominant sind, wird er auch Diffus- oder Fernfeld genannt.

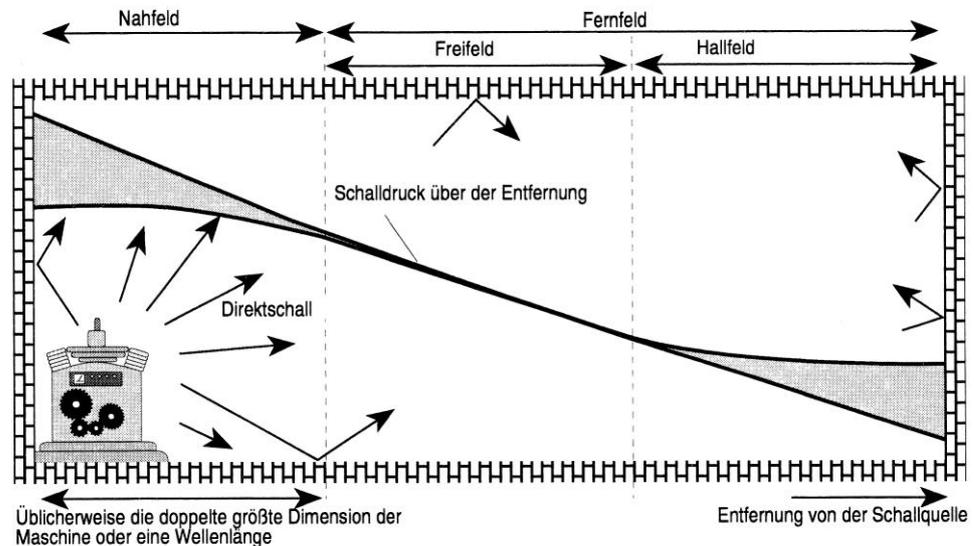
Führen Sie andererseits die Messung zu nahe an der Maschine durch, können Sie feststellen, dass der Schalldruckpegel durch kleine Abstandsänderungen von der Maschine beträchtlich schwanken kann. Auch das ist eine unbefriedigende Situation. Dieser Bereich wird Nahfeld genannt. Die Faustregel lautet, dass das Nahfeld ungefähr nach einer Wellenlänge des abgestrahlten Schalls mit der niedrigsten Frequenz oder im Abstand der doppelten, größten Abmessung der Maschine endet. Zweifellos wird für die Wahl der Messpunkte der Bereich zwischen dem Nahfeld und dem Diffusfeld empfohlen, um die akustische Emission der Maschine möglichst gut zu beschreiben.

Dieser Bereich weist Gemeinsamkeiten mit dem Freifeld auf (z. B. gilt hier das $1/r^2$ -Gesetz) und er wird auch als Freifeldbereich bezeichnet.

Falls Sie diesen Bereich in irgendeinem Raum feststellen wollen, werden Sie vergeblich nach einem 6dB-Abfall bei Entfernungsverdoppelung suchen. Wahrscheinlich wird der Abfall zwischen 3 und 5 dB liegen. Der Grund für diese Erscheinung ist – obwohl die Wände weit weg sein können – die Bodennähe, wodurch Reflexionen entstehen, die die Freifeldbedingungen stören können.

In manchen Fällen kann der Raum um die Maschine so klein sein, dass zwischen Nahfeld und Hallfeld kein Freifeld zustande kommen kann.

In der Realität vorkommende Räume liegen zwischen reflexionsfreien Räumen und Hallräumen, deshalb können Elemente von beiden an unterschiedlichen Orten des Raumes festgestellt werden...



Findet man jedoch ein Freifeld, so sind die Messungen vorzugsweise dort durchzuführen. Wichtig ist hier die Tatsache, dass diese Betrachtungen nur dann relevant sind, wenn nur die Maschine das Messobjekt ist. Wenn die Messaufgabe die Feststellung der Lärmeinwirkung auf Mitarbeiter ist, so sind die Messpunkte so nahe als möglich an deren Ohren zu wählen, um den für den Menschen relevanten Lärmpegel zu messen.

Im nächsten Kapitel wird ein kurzer Überblick über Schallmessungen geboten.

Abschnitt 8

Lärm am Arbeitsplatz

Bisher haben wir uns nur mit Messungen an Maschinen und in Räumen beschäftigt.

Bei Lärmmessungen am Arbeitsplatz ist hauptsächlich der Gesamtlärm und dessen Einwirkung auf den Menschen wichtig.

Deshalb wird der Gesamtschallpegel ungeachtet der Anzahl der Schallquellen und der Reflexionen ermittelt.

Zusätzlich muss der Lärm dort gemessen werden, wo sich der Mitarbeiter im Rahmen seiner Tätigkeit aufhält. Befindet er sich in einem Nahfeld, so ist eine Messung im Nahfeld durchzuführen, ohne Berücksichtigung der Aspekte aus dem Kapitel *Raumakustik*.

Die Gegenwart anderer Maschinen sowie reflektierende Oberflächen werden erst dann relevant, wenn Messungen hinsichtlich der Senkung des Lärmpegels durchgeführt werden sollen, aber auch, um festzustellen, ob z. B. das linke Ohr einer höheren Belastung ausgesetzt ist, als das rechte.

In diesem Fall ist die Messung an jenem Ohr durchzuführen, wo der höhere Pegel auftritt, oder auch an beiden, aber die Messergebnisse dürfen nicht gemittelt werden. Die Aufgabe - die Ermittlung des Schädigungsrisikos für das Gehör - wird nicht erfüllt, wenn ein Maximalpegel durch Mittelung mit einem niedrigeren zweiten Pegel reduziert wird.

Typische Maßnahmen zur Lärminderung

Angenommen, es wurde eine Überschreitung des zulässigen Schallpegels gemessen - entweder weil er eine zu große Belästigung darstellt, oder - noch schlimmer - weil er ein Gehörschadenrisiko darstellt - was ist nun zu tun?

- Schall soll an seiner Quelle abgebaut oder zumindest reduziert werden. Konstruktive Änderungen an der Maschine selbst oder an ihrem Standort können die Folge sein.
- Die Schallübertragungswege sind durch Kapselungen oder Abdeckungen zu unterbrechen.
- Ein Akustikspezialist würde ein Lärmproblem auf ein Schwingungsproblem zurückführen. Möglicherweise ist eine Montage der Maschine auf vibrationsabsorbierenden Isolatoren sinnvoll, um die Übertragung über den Boden zu mindern.
- Mitarbeiter sind mit Gehörschutz auszustatten. In manchen Ländern ist dies nur eine vorübergehende Lösung, und wird nicht als Dauerlösung akzeptiert.
- Die Montage von absorbierenden Materialien kann den gesamten Schallpegel reduzieren. Diese Methode funktioniert allerdings nicht für Mitarbeiter, die sich im Nahfeld einer Schallquelle aufhalten, da das Diffusfeld, das durch die reflexionsmindernden Materialien beeinflusst wird, kaum Einfluss aufs Nahfeld hat.

Abschnitt 9

Umgebungsärm

Unter Umgebungsärm versteht man den auf uns im täglichen Leben einwirkenden und als lästig erscheinenden Lärm, sowie jeder Lärm, der eine Minderung der Lebensqualität darstellt. Hierunter versteht man aber nicht den Lärm am Arbeitsplatz, der im vorangehenden Kapitel näher erklärt wird.

Umgebungsärm beinhaltet Dinge wie Verkehrslärm, Fluglärm, Lärm durch Baustellen oder Alarmanlagen usw.

Wie üblich ist beim Messen hier das Prinzip der Datenreduktion wichtig. Einen Kompromiss zwischen Datenreduktion und einer guten Situationsbeschreibung zu finden, ist die Zielsetzung.

Der L_{eq} spielt zusammen mit dem Schalldruckpegel eine große Rolle. Jedoch besteht zwischen Messungen dieser Art und z. B. Lärmmessungen am Arbeitsplatz ein großer Unterschied. Dort geht es um Gesundheitsschädigung, während beim Umgebungsärm die Belästigung im Vordergrund steht.

So genügt nur ein vorbeifahrendes Fahrzeug, um den Schlaf vieler Menschen zu stören. Jedoch ist der Einfluss eines einzigen Fahrzeuges auf den L_{eq} einer ganzen Nacht gering. Nicht einmal der maximale Schalldruckpegel ist hier von Bedeutung, da dieser wahrscheinlich auch nicht allzu hoch war.

Ein Lösungsweg ist die Neubewertung von Schallereignissen in der Nacht, ein zweiter die Ermittlung der statistischen Verteilung des Schallpegels.

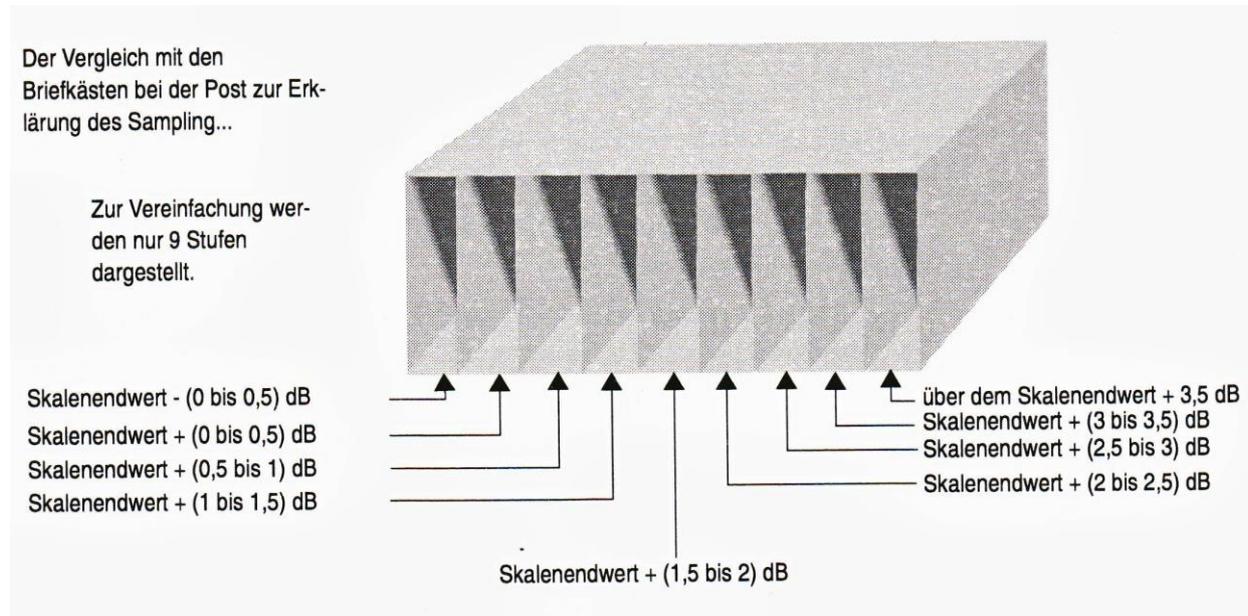
Statistik

Das Zusammenstellen von Daten zur statistischen Analyse von Schallpegeln beinhaltet das Entnehmen von Stichproben. Um eine ausreichende Zahl von Stichproben zu erhalten (bei herkömmlichen Statistiken z. B. die ausreichende Zahl von Befragten) entnimmt der Schallpegelmesser 131 16 Stichproben (Samples) pro Sekunde. Andere Schallpegelmesser können andere Samplingraten aufweisen.

Nach Norm sollten allerdings mindestens 10 Sample pro Sekunde genommen werden.

Es muss allerdings hinzugefügt werden, dass dieses Sampling nichts mit dem Sampling von digitalen Musikinstrumenten, Computern und CD-Spielern zu tun hat. Dort wird das Sampling benötigt, um eine Analog-Digital-Umwandlung durchzuführen.

Beim Schallpegelmesser 131 dient es zur Aufnahme einer ausreichend großen Zahl von Stichproben.



Zurück zu den entnommenen, »gesampten« Schallproben. Die gemessenen Schallpegel werden wie Briefe bei der Post entsprechend ihren Pegelwerten sortiert. Dabei werden sie in 167 Stufen mit jeweils 0,5 dB Breite unterteilt (diese Stufen sind mit den Briefkästen bei der Post vergleichbar). Eine weitere Stufe dient für alle Schallereignisse, die 80dB unterhalb des Skalenendwertes liegen, und eine zweite für die, die 3,5dB über dem Skalenendwert liegen.

Diese Stufenbreite von 0,5dB wird im Fachjargon als Klassenbreite bezeichnet. Der Schallpegelmesser 131 weist somit eine Klassenbreite von 0,2dB auf.

Percentile (Überschreitungspegel)

Während der Messung zählt der Schallpegelmesser 131 mit, wie oft eine Stichprobe in eine bestimmte Klasse fällt.

Nun könnte die statistische Verteilung über die relative Häufigkeit berechnet werden. Wir gehen allerdings anders vor. Wir wollen - mit einfachen Worten - etwas über die Verteilung wissen, ohne allerdings die Form der Verteilungskurve kennen zu wollen (daher werden Erwartungswert und Standardabweichung nicht ermittelt). Idealerweise soll das mit wenigen Zahlen verbunden sein. Ist dies überhaupt möglich? Die Antwort ist: Berechnung der Percentile.

Das Percentil X definiert den Schallpegel, der während X% der Messdauer überschritten wurde, und wird als L_X bezeichnet.

Demnach ist der L_{99} , jener Pegel, der in 99% der Messdauer überschritten wurde, der L_{50} , jener, der während der halben Messdauer überschritten wurde, und der $L_{0,1}$ jener, der in 0,1 % der Messdauer überschritten wurde.

Sie werden nun fragen, wie Percentile zu interpretieren sind. Mit etwas Überlegung ist erkennbar, dass der L_{99} , nahezu dem Hintergrundrauschen entspricht, während der $L_{0,1}$ fast gleich dem Maximalpegel ist, da er nur in 0,1 % der Messzeit überschritten wurde. Das wiederum bedeutet, dass durch geschickte Wahl einiger weniger Percentile eine gute Beschreibung über die Pegelverteilung während der Messdauer gegeben werden kann.

Beim Schallpegelmesser 131 gibt es 8 fest eingestellte Percentile: $L_{0,1}$, L_1 , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{90} , L_{95} und L_{99} . Zusätzlich kann ein Percentilwert vom Benutzer frei definiert werden.

Berechnung der Percentile

Ein Percentil, z. B. der L_5 , wird folgendermaßen berechnet: Die Anzahl der Stichproben (Samplings) aller Klassen wird addiert, wodurch sich die Gesamtanzahl der Stichproben ergibt. Daraus kann jene Anzahl berechnet werden, die 5 % der Gesamtanzahl ausmacht. Da die Percentile die Zeit beschreiben, während der ein bestimmter Pegel überschritten wurde, wird nun mit der höchsten Klasse (die Klasse mit den höchsten Pegeln) die Stichprobenanzahl solange abwärts addiert, bis 5 % der gesamten Stichproben erreicht werden. Die Klasse, bei der das zutrifft (bzw. der damit verbundene Pegel) ist die Lösung. Angenommen, in 5 % der Zeit wurden 85,5 dB überschritten, so ist der L_5 85,5 dB.

Abschnitt 10

Einige Grundregeln für Schallmessungen in der Praxis

- Als erstes ist sich Klarheit über anwendbare Normen und Regeln für die durchzuführende Messung zu verschaffen.
- Danach sollten die Messgeräte auf richtige Funktion überprüft werden. Die Batterieversorgung von Schallpegelmessern und Kalibratoren ist zu kontrollieren. Allgemein gilt, dass die Batterien entnommen werden sollen, wenn die Messgeräte längere Zeit nicht verwendet werden. (Dabei ist zu berücksichtigen, dass gespeicherte Daten beim Entnehmen der Batterien gelöscht werden können.) Des Weiteren sollte ein Satz Reservebatterien bereitstehen.
- Die Messgeräte müssen korrekt kalibriert werden. Vollständigerweise ist vor und nach der Messung zu kalibrieren.
- Wir empfehlen außerdem die Anfertigung einer Skizze der Messstelle. Vermerken Sie Hauptschallquellen und Schallhindernisse.
- Bestimmen Sie, in welcher Art Schallfeld Sie sich befinden. Machen Sie einige Testmessungen, um die optimale Messstelle und den geeigneten Messbereich zu finden. Vermerken Sie die Messstelle auf der Skizze. Bringen Sie außerdem einen Maßstab an, um die Messstelle später wieder zu finden.
- Wählen Sie die richtige Zeitkonstante (F, S oder I) sowie die erforderliche Messdauer.
- Bei der Messung ist das Messgerät vom Körper wegzuhalten oder auf einem Stativ zu montieren.
- Halten Sie sich während der Messung von reflektierenden Flächen fern.
- Messen Sie in passendem Abstand von der Schallquelle.
- Überprüfen Sie gegebenenfalls den Hintergrundgeräuschpegel.
- Nichts, auch Sie selbst nicht, darf die Schallquelle verdecken.
- Bei Messungen in staubiger, feuchter oder windiger Umgebung ist ein Windschirm anzubringen.
- Wurde das Messinstrument während der Messung übersteuert, so sind die Messdaten nicht gültig.

- Der Messbericht sollte ausführlich sein und alles enthalten, um die Messung einschließlich der Kalibrierung nachvollziehen zu können. Umweltbedingungen, wie z. B. Wind, sind zu vermerken, ebenso Daten über das Messobjekt (z. B. Maschinentypen und Seriennummer, Belastungszustand), Datum der Durchführung und Name des Ausführenden. Alles in allem macht nur ein sorgfältig verfasster Bericht einen späteren Vergleich mit anderen Messungen möglich.