

# Bestimmung der Schalleistung von Zentrifugen über Schallintensitätsmessungen

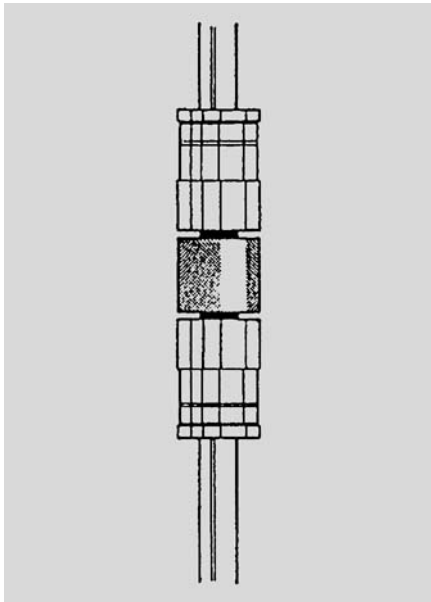
PETER STELTER UND ANDREAS HARMS\*

Zur Beurteilung der Schallemission von Maschinen dient häufig der in einem Meter Abstand gemessene Schalldruckpegel. Der Schalldruckpegel hängt von der Meßentfernung, der manchmal vorhandenen Richtcharakteristik der Maschine und von den Schallabsorptionseigenschaften des Aufstellungsraumes ab und ist damit als lokale Feldgröße nicht sehr gut als kennzeichnende Schallemissionsgröße von Maschinen geeignet. Dagegen ist der Schalleistungspegel eine globale und damit maschinenspezifische Schallemissionsgröße, weil die Störeinflüsse korrigiert werden und der Wert bei beliebigen Meßbedingungen reproduzierbar ist. Der Schalleistungspegel kann mit Hilfe des nach DIN 45 635 genormten Hüllflächenverfahrens oder mit dem Schallintensitätsverfahren ermittelt werden. Bei der Schallintensitätsmessung eröffnet eine spezielle Meßsonde die Möglichkeit, Schallintensitäten direkt auf der Hüllfläche zu messen. Da keine nachträglichen Korrekturen zur Bestimmung des

Schalleistungspegels erforderlich sind, ist dieses Verfahren, trotz zunächst aufwendiger Meßtechnik, in der Praxis häufig schneller und genauer als das Hüllflächenverfahren. Die Vor- und Nachteile der Schalldruck- und Schallintensitätsmessung werden anhand einer praxisnahen Messung an einer Zentrifuge ermittelt und miteinander verglichen.

Determining the Sound Power of Centrifuges by Means of Sound Intensity Measurements

The sound pressure level measured at a distance of one meter is frequently used to assess the sound emission of a machine. The sound pressure level depends on the measuring distance, the directivity pattern, if any, of the machine and on the sound-absorbing properties of the place of installation. Because it is a local field parameter it is not very suitable for ascertaining the sound emission of a machine. In contrast to, the sound power level is far more suitable because the influence mentioned earlier can be corrected and the value is reproducible for any random test condition. Generally, it is calculated from the results of sound pressure level measurements by application of the standardised enveloping surface method. Concerning sound intensity measurements a special probe allows ascertainment of the sound intensities directly on the enveloping surface. Despite an initially elaborate measuring technology, this method is in fact often faster and more exact than the enveloping surface method because it does not require subsequent correction to determine the sound power level. The benefits and drawbacks of sound pressure and sound intensity measurements are compared with each other on the basis of measurements on centrifuges directly related to practical operation.



## 1 Einleitung und Problemstellung

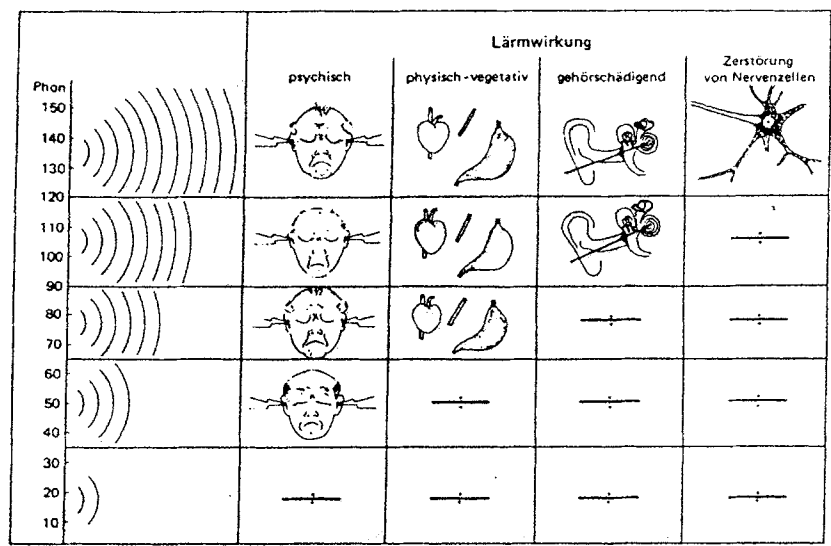
Hochentwässerungszentrifugen werden mit zunehmend höheren Leistungsdichten und damit häufig höheren Drehzahlen und Durchsätzen betrieben. Demgegenüber besteht die Forderung nach mehr Ergonomie der zur Bedienung und Wartung eingesetzten Menschen. Vor allem die Forderung nach geringeren Schallemissionswerten wird immer wichtiger, da Lärm sowohl psychische Wirkungen wie Unwohlsein und Streß, als auch physisch-vegetative Störungen, bis hin zu irreparablen Gehörschädigungen verursachen kann.

Der Zusammenhang zwischen Schallstärke und Lärmbeträchtigung kann anschaulich im sogenannten Lärmstufenschema nach LEHMANN (s. Abb. 1) dargestellt werden.

Um Kundenforderungen und Gesetzesauflagen zu erfüllen, muß der Hersteller zum einen alle Anstrengungen unternehmen, leisere Maschinen zu konstruieren und

\* Dr.-Ing. P. STELTER, Dipl.-Phys. A. HARMS, KHD Humboldt Wedag AG, D-51057 Köln.

Abbildung 1.  
Physiologische Belastungen durch Lärm in Abhängigkeit von der Schallstärke (Lärmstufenschema) nach LEHMANN.



zu bauen. Hinweise hierzu finden sich in [1]. Zum anderen muß er sichere und reproduzierbare Meßmethoden zur Bestimmung einer maschinenspezifischen Lärmemissionsgröße einführen, da z. B. eine Aussage über die Schallemission einer Maschine fester Bestandteil einer jeden Maschinendokumentation gemäß der Maschinenrichtlinie (EN 292, Teil 2) ist.

2 Personenbezogener Beurteilungspegel

Die Beeinträchtigungen durch Lärm sind neben der reinen Abhängigkeit von der Schallstärke, auch von der Einwirkungsdauer des Lärms abhängig. Um die dem Lärm ausgesetzten Mitarbeiter vor Lärmschädigungen zu bewahren, regeln gesetzliche Bestimmungen und Normen, wie etwa die Unfallverhütungsvorschrift VBG 121 der Berufsgenossenschaft, die Aufenthaltsdauer von Personen in lärmbelasteten Räumen. Dabei gilt ein Raumschalldruckpegel von 85 dB(A) als zulässiger oberer Grenzwert für eine Aufenthaltszeit von 8 Stunden. Dieser sogenannte personenbezogene Beurteilungspegel von 85 dB(A) ist wohl – zumindest ohne bleibende Schäden – ertragbar. Herrscht im Raum ein höherer Schalldruckpegel, so ist eine entsprechend kürzere Aufenthaltszeit einzuhalten. Eine Pegelerhöhung von 3 dB führt zu einer Halbierung der zulässigen Aufenthaltszeit.

Der Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Aufenthaltszeit ist in Tab. 1 dargestellt.

Tabelle 1.  
Abhängigkeit der Aufenthaltszeit vom Schalldruckpegel

Schalldruckpegel in [dB(A)]	85	88	91	94	97	100	105
Aufenthaltszeit in [min]	480	240	120	60	30	15	5

Bei bekanntem Schalldruckpegel ist die zulässige Aufenthaltszeit nach Gl. (1) berechenbar.

t\_zul = 8 h · 10^{(-0,1 L\_p - 8,5)} (1)

Der Zusammenhang ist in Abb. 2 illustriert. Es ist zu erkennen, daß mit zunehmendem Schalldruckpegel die zulässige Aufenthaltszeit rasch abnimmt. Bei einem Raumschalldruckpegel von 105 dB, ein für Zentrifugen ohne Schallmaßnahmen in kleinen, schallharten Räumen nicht ungewöhnlicher Wert, sind damit nur noch 5 min Aufenthaltszeit erlaubt.

3 Vorgehensweise beim Hüllflächenverfahren

Zur Bestimmung des Schalleistungspiegels einer Maschine bestehen im wesentlichen zwei praxisnahe Möglichkeiten: das Hüllflächenverfahren nach DIN 45 635 [2] und das Schallintensitätsmeßverfahren (1995 noch nicht abschließend genormt, Normenentwurf in [2]). Beide Verfahren werden im folgenden gegenübergestellt.

Beim Hüllflächenverfahren wird der zeitliche Effektivwert des Schalldruckpegels L\_p an verschiedenen Punkten einer in Form und Größe beliebigen, die Maschine einhüllenden Fläche S gemessen. In der Praxis wird häufig ein Quader mit der Seitenlänge l, der Breite b und der Höhe h verwendet, da die Meßabstände bei der Handmessung einfach einzuhalten sind. Der Meßabstand von der Maschinenoberfläche wird i. a. größer als 1 m gewählt, damit die Meßpunkte für den interessierenden Frequenzbereich von 300 bis

Abbildung 2.  
Zulässige Aufenthaltszeit in Abhängigkeit vom personenbezogenen Beurteilungs-Schalldruckpegel.

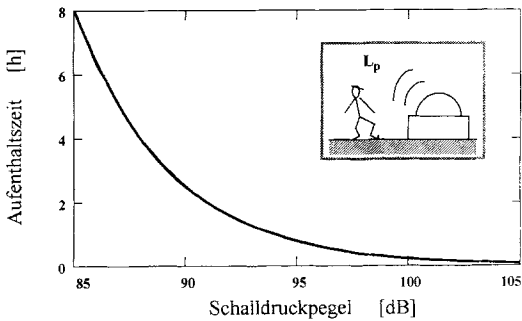


Abbildung 3.  
Darstellung des einhüllenden Bezugsquaders mit  
Meßpunkten nach dem Hüllflächenverfahren (DIN 45 635) [2].

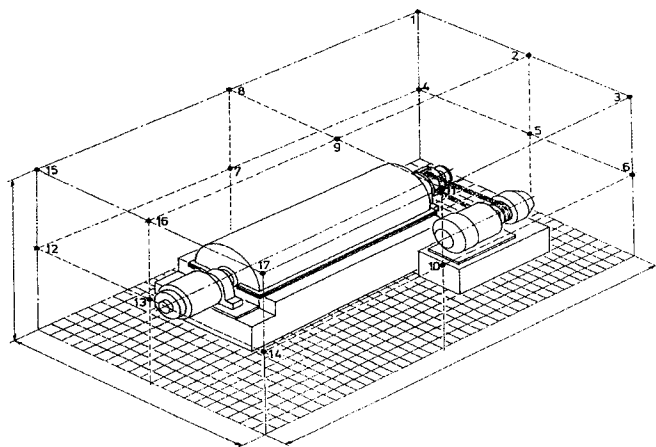
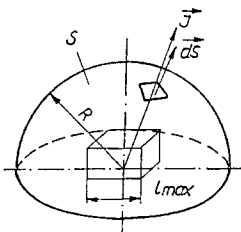


Abbildung 4.  
Hüllfläche mit Flächennormalenvektor und Schallintensitäts-  
vektor aus [4].



5000 Hz im Schallfernfeld liegen. Die Meßfläche  $S$  wird aus der Quaderoberfläche ohne die Bodenfläche gebildet (s. Abb. 3).

$$S = bl + 2h(b + l) \tag{2}$$

Die Schalleistung  $P$ , die über diese Meßfläche abgegeben wird, ergibt sich aus der Integration über die Hüllfläche  $S$  der senkrecht aus der Meßfläche austretenden Schallintensität  $I$

$$P = \oint_S \vec{I} \, d\vec{S} \tag{3}$$

Die Schallintensität  $I$  hat Vektorcharakter, sie beschreibt analog zum Pointing-Vektor den Energiefluß durch eine Fläche (s. Abb. 4).

Alle Schallfeldgrößen sind zeitlich und räumlich veränderliche Größen, die sich bei harmonischem Zeitverlauf als komplexe Zeiger mit Wirk- und Blindanteil darstellen lassen. Bei Zutreffen der Fernfeldbedingung, d. h.

Tabelle 2.  
Erklärung der Schallpegelgrößen.

Schallpegel	Pegeldefinition [dB]	Bezugsgröße	Beziehungen
Schalldruckpegel	$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$	$p = Z v$
Schallschnellepegel	$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0}$	$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v = \frac{I}{p}$
Schallintensitätspegel	$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$	$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$I = p v = \frac{p^2}{Z}$
Schalleistungspegel	$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_0}$	$P_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$	$P = A \frac{p^2}{Z}$

die Wellenlänge  $\lambda$  ist kürzer als der Meßabstand  $r$  ( $(\lambda/2\pi)r \leq 1$ ), dem Vorhandensein von ebenen Wellen und der Tatsache, daß sich Druck und Schnelle in Phase befinden, vereinfachen sich die Zusammenhänge. Es wird meßtechnisch der Effektivwert erfaßt, so daß für zeitharmonische Signale, etwa für den Druck gilt:  $p = p_{\text{eff}} = \hat{p}/\sqrt{2}$ . Die Schallintensität ist das Produkt des Effektivwertes aus Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$ , wobei die Schnelle über den Wellenwiderstand, Schallfeldimpedanz oder Schallkennimpedanz des Ausbreitungsmediums  $Z = \rho c$  mit dem Druck verknüpft ist:

$$v = \frac{p}{Z} \tag{4}$$

Somit folgt für die Schallintensität  $I = p v$ :

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \tag{5}$$

Die Schallschnelle  $v$  als Geschwindigkeit der Mediumpartikel mit typischen Werten von  $v = 0,2 \text{ mm/s}$  bei Schalldrücken von  $L_p = 74 \text{ dB}$ , ist verschieden von der Schallgeschwindigkeit ( $c = \text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Störung}$ ), deren typischer Wert für Luft bei  $20^\circ\text{C}$   $340 \text{ m/s}$  beträgt. Den Effektivwert der Schalleistung  $P$  erhält man aus dem (örtlichen) Mittelwert des Effektivschalldruckes  $\bar{p}$  durch Multiplikation mit der Meßfläche  $S$ .

$$P = I S = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} S \tag{6}$$

In Pegelschreibweise lautet die Gleichung für den Schalleistungspegel

$$10 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0} + 10 \lg \frac{S}{S_0} - 10 \lg \frac{\rho c}{(\rho c)_0} \tag{7}$$

$$\underbrace{L_w}_{L_w} = \underbrace{L_p}_{L_p} + \underbrace{L_S}_{L_S} - \underbrace{K_0}_{K_0} \tag{8}$$

Nach DIN 45 635 wird die Schalleistungsermittlung aus einer Schalldruckpegelmessung wie folgt vorgenommen:

Aus dem Meßflächenschalldruckpegel  $L_p$ , wird durch Abzug verschiedener Korrekturpegel der Meßflächenschalldruckpegel  $\bar{L}_p$  berechnet. Unter den sogenannten „Freifeldbedingungen“, also reflektionsfreier Ausbreitung der Schallwellen, ist der Betrag des Schalldruckpegels gleich dem Betrag des Schallintensitätspegels. Bei Messungen in Räumen muß der Schalldruckpegel um die Raumkorrektur  $K_2$  und gegebenenfalls um die Fremdgeräuschkorrektur  $K_1$  korrigiert werden.

Bei hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeit (Genauigkeitsklasse 1 nach DIN 45 635, Teil 1) sind der aktuelle Luftdruck- und Lufttemperatureinfluß zu korrigieren.

Tabelle 3.  
Mittlerer Schallabsorptionsgrad für verschiedene Räume.

Beschreibung des Raumes	$\bar{\alpha}$
Fast leerer Raum mit glatten, harten Wänden aus Beton, Putz oder Backsteinen	0,05
Teilweise leerer Raum, Raum mit glatten Wänden	0,10
Rechteckiger Maschinenraum, ohne schallabsorbierende Elemente	0,15
Maschinenraum oder Arbeitsstätte mit Einrichtungen – unregelmäßig geformt	0,20
Maschinenraum mit teilw. schallabsorbierendem Material an Decke und Wänden	0,25
Raum mit schallabsorbierendem Material an Decke und Wänden	0,35
Raum mit stark absorbierendem Material an Decke und Wänden	0,50

$$\bar{L}_p = \bar{L}_p' - K_0 - K_1 - K_2 \quad (9)$$

Mit Hilfe des Meßflächenmaßes  $L_S$  wird abschließend der Schalleistungspegel berechnet.

$$L_W = \bar{L}_p + L_S \quad (10)$$

Die Variablen bedeuten im einzelnen:  $L_W$  Schalleistungspegel,  $\bar{L}_p'$  auf der Meßfläche gemittelter Schalldruckpegel,  $\bar{L}_p$  korrigierter Meßflächenschalldruckpegel,  $K_0$  Korrekturpegel für Luftdruck und Lufttemperatur,  $K_1$  Korrekturpegel für Hintergrund- bzw. Fremdgeräusch,  $K_2$  Korrekturpegel für Umgebungs- oder Raumeinfluß,  $L_S$  Meßflächenmaß.

Die Bedeutung und Ermittlung der einzelnen Korrekturpegel wird in den folgenden Abschnitten kurz erläutert. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Pegelgrößen ist in Tab. 2 gegenübergestellt.

### 3.1 Korrekturpegel für den Raumeinfluß

Falls kein spezieller Schallmeßraum zur Verfügung steht, findet die Schallmessung in Räumen mit mehr oder weniger stark reflektierenden und absorbierenden Wänden statt. Dies gilt vor allem bei Messungen direkt am Aufstellungsort der Maschinen, d. h. bei Zentrifugen zur mechanischen Fest/Flüssig-Trennung, in den üblichen Hallen mit Platten- oder Betonwänden.

Die reflektierten Schallwellen fallen von allen Seiten durch die Meßfläche und verfälschen somit das Meßergebnis. Als Folge davon hängt der im Raum gemessene Schalldruckpegel (Raumpegel) von den Reflexions- und Absorptionseigenschaften des Raumes ab. Die Absorptionseigenschaften eines Raumes werden durch die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$  charakterisiert. Sie ist auf experimentellem Weg über die Nachhallzeit des Raumes bestimmbar. Hierbei gilt die bekannte Sabinesche-Formel:

$$A = 0,163 \frac{V}{T} \quad (11)$$

wobei  $V$  das Raumvolumen in Kubikmetern und  $T$  die gemessene Nachhallzeit in Sekunden bedeuten. Die Bestimmung der Nachhallzeit über einen Knall oder Rauschgeneratoren ist in der Praxis vergleichsweise umständlich oder kostenaufwendig.

Während der Projektierungsphase für den Raum besteht die Möglichkeit, den Raumeinfluß über den mittleren Schallabsorptionsgrad  $\bar{\alpha}$ , der in Tab. 3 tabelliert ist, abzuschätzen.

Mit der Gesamtoberfläche  $S_V$  des Raumes und des mittleren Schallabsorptionsgrades  $\bar{\alpha}$  ist die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$  berechenbar

$$A \approx \bar{\alpha} S_V \quad (12)$$

Der Korrekturpegel für den Raumeinfluß  $K_2$  ergibt sich aus folgender Beziehung

$$K_2 = 10 \lg \left( 1 + \frac{4}{A/S} \right) = 10 \lg \left( 1 + \frac{4 S}{\bar{\alpha} S_V} \right) \quad (13)$$

In Abb. 5 ist der Korrekturpegel für eine bestimmte Raumgeometrie ( $S_V/S = 10$ ) in Abhängigkeit vom mittleren Schallabsorptionsgrad dargestellt. Man erkennt, daß die Korrektur immer größer wird, je schallhärter der Raum ist.

Abbildung 5.  
Korrekturpegel  $K_2$  für den Raumeinfluß in Abhängigkeit vom mittleren Schallabsorptionsgrad und dem Verhältnis Raumfläche/Meßfläche.

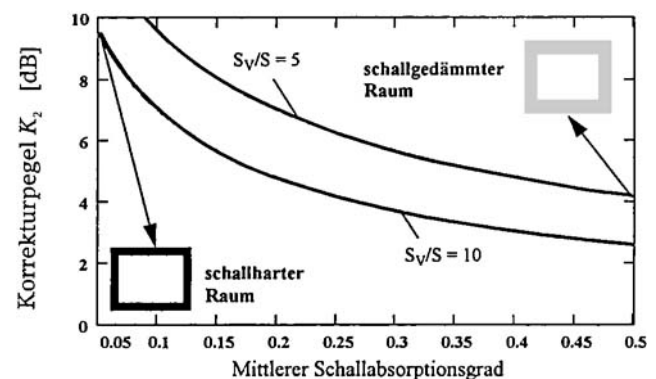
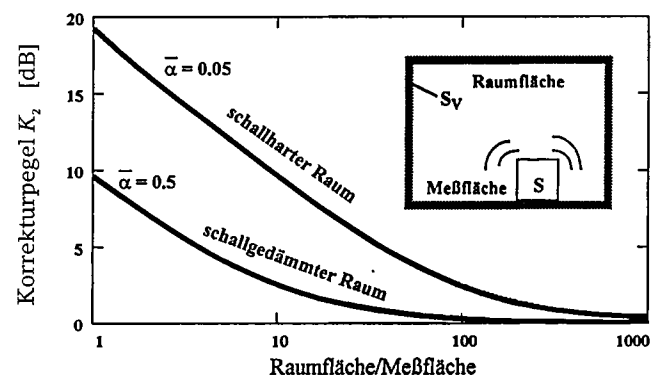


Abbildung 6.  
Korrekturpegel  $K_2$  für den Raumeinfluß in Abhängigkeit vom Verhältnis der Raumfläche  $S_V$  zur Meßfläche  $S$ .



Der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von äquivalenter Schallabsorptionsfläche zur Meßfläche  $A/S$  und dem Raumkorrekturpegel  $K_2$  ist in Abb. 6 dargestellt. Um eine Meßabweichung von unter 1 dB zu erreichen, muß das Verhältnis von  $A/S$  größer als 15 sein. Bei einem mittleren Schallabsorptionsgrad von z. B.  $\bar{\alpha} = 0,2$  ergibt sich damit eine erforderliche Raumfläche von  $S_V = 15 S/0,2 = 75 S$ . Die Raumfläche  $S_V$  muß also 75 mal größer als die Meßfläche  $S$  sein, um den Meßfehler kleiner als 1 dB zu halten. Dies ist bei größeren Maschinen mit Meßflächen von ca. 80 m<sup>2</sup> praktisch nur in sehr großen Hallen erreichbar.

Es bleibt festzuhalten, daß das Meßergebnis einer Schalldruckmessung in geschlossenen Räumen um so stärker verfälscht wird, je schallhärter der Raum ist und je größer die Meßfläche der Maschine im Verhältnis zum Aufstellungsraum ist.

3.2 Korrekturpegel für Hintergrundgeräusche

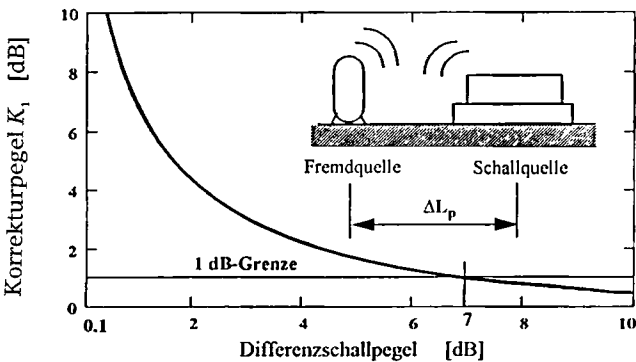
In der Praxis wird die Schallmessung häufig in Produktionsbetrieben erforderlich, in denen andere Maschinen arbeiten und somit Hintergrundschall oder Fremdschall vorhanden ist. Um die Korrektur für das Fremdgeräusch zu erfassen, wird der stationäre Hintergrundschallpegel  $\bar{L}_p''$  auf der Hüllfläche gemessen. Hierzu ist die zu messende Maschine stillzusetzen (!), was in der Praxis nicht immer einfach möglich ist.

Der Korrekturpegel für Fremdgeräusch  $K_1$  berechnet sich in Abhängigkeit des Differenzschalldruckpegels  $\Delta L_p = L_p' - L_p''$  nach den Regeln für die Subtraktion von Schallpegeln

$$K_1 = -10 \lg(1 - 10^{-0,1 \Delta L_p}) \tag{14}$$

In Abb. 7 ist der Korrekturpegel in Abhängigkeit vom Differenzschalldruckpegel dargestellt. Es ist zu erkennen, daß erst ab einem Differenzschallpegel von  $\Delta L = 7$  dB der Korrekturwert unter 1 dB liegt. Zur Verringerung der Meßabweichung ist es günstig, einen Pegelabstand von 10 dB und größer zwischen Hintergrundgeräusch und Maschinengeräusch zu realisieren.

Abbildung 7. Korrekturspiegel  $K_1$  für den Fremdgeräuscheinfluß in Abhängigkeit vom Differenzschalldruckpegel zwischen Hintergrundschallpegel (Fremdquelle) und zu messendem Maschinenpegel (Schallquelle).



3.3 Korrekturpegel für Luftdruck und Temperatur

Wie zuvor beschrieben, sind Schalldruck und -schnelle über die Schallkennimpedanz  $Z$  verknüpft. Da die Luftdichte  $\rho$  druck- und die Schallgeschwindigkeit  $c$  temperaturabhängig ist, muß die Schallkennimpedanz bei genauen Messungen auf Referenzbedingungen (20 °C, 1000 mbar) umgerechnet werden. Der Korrekturpegel für Luftdruck und Lufttemperatur  $K_0$  ist wie folgt definiert

$$K_0 = 20 \lg \frac{\rho c}{(\rho c)_0} \tag{15}$$

Mit der speziellen Gaskonstanten  $R_i$  und dem Isentropenexponenten  $\kappa$  für Luft folgt für die Schallgeschwindigkeit  $c = \sqrt{\kappa R_i T}$ . Das Ersetzen der Luftdichte, unter Verwendung des idealen Gasgesetzes  $p \rho^{-1} = R_i T$  führt zur Schallkennimpedanz  $Z$ .

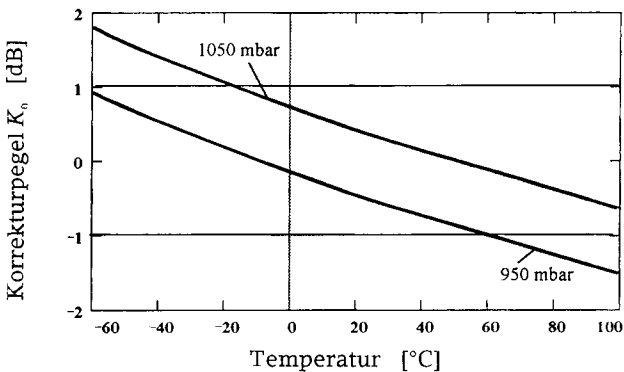
$$Z = \rho c = p \sqrt{\frac{\kappa}{R_i T}} \tag{16}$$

Der Korrekturpegel  $K_0$  für Luftdruck und Temperatur ergibt sich damit als praktische Zahlenwertgleichung.

$$K_0 = 20 \lg \left( \sqrt{\frac{293}{273 + t_s}} \frac{p_s}{1000} \right) \tag{17}$$

Hierbei wird  $t_s$  die auf der Meßfläche gemessene Lufttemperatur in [°C] und  $p_s$  der Luftdruck in [mbar] eingesetzt. Abb. 8 zeigt den Einfluß von Luftdruck und -temperatur auf den Korrekturpegel. Aus dem Verlauf ist zu erkennen, daß erst bei relativ extremen Temperaturwerten der Korrekturwert größer als 1 dB wird. Bei Messungen mit geringen Anforderungen an die Genauigkeit kann die Druck- und Temperaturkorrektur daher meist entfallen.

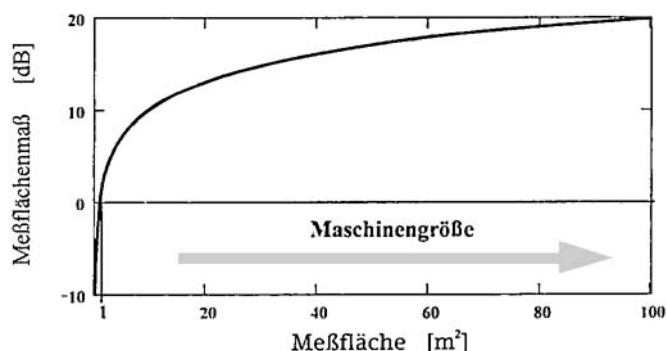
Abbildung 8. Korrekturspiegel  $K_0$  für Luftdruck und -temperatur in Abhängigkeit von der Meßflächentemperatur.



3.4 Meßflächenmaß

Der Schalleistungspegel  $L_W$  folgt aus dem korrigierten Schalldruckpegel durch Addition des Meßflächenmaßes  $L_S$ . Das Meßflächenmaß in Abhängigkeit der Meßfläche ist in Abb. 9 dargestellt. Betrachtet man die Größenordnungen der Korrekturen für Druck und Temperatur  $K_0 < 1$  dB, für das Hintergrundgeräusch ca. 0.5 bis 5 dB und für den Raumeinfluß 4 bis 7 dB, so ist das Meßflächenmaß betrags-

Abbildung 9.  
Meßflächenmaß  $L_5$  in Abhängigkeit von der Meßfläche  $S$ .



mäßig die größte „Korrektur“ bei der Berechnung des Schallleistungspegels für größere Maschinen. Für Maschinen mit Quadergrößen von  $4 \times 7 \times 3$  m beträgt die Meßfläche  $94 \text{ m}^2$  und damit das Meßflächenmaß  $19,7 \text{ dB}$ .

Bei großen Maschinen mit Meßflächen größer als  $1 \text{ m}^2$  und bei nicht vorhandener Richtcharakteristik ist in ca. einem Meter Abstand von der Maschine der Schalleistungspegel immer größer als der Schalldruckpegel. Das ist sicherlich ein Grund dafür, daß sich der Schalleistungspegel in der Praxis noch nicht überall durchgesetzt hat. Viele Anwender beachten nicht den Unterschied zwischen dem Schalleistungspegel der Maschine und dem Raumschalldruckpegel. Die Hersteller tun sich daher nicht leicht, den zahlenwertmäßig höheren Schalleistungspegel ohne weitere Erläuterungen in der technischen Dokumentation einer Maschine zu beschreiben.

## 4 Schallintensitätsmeßverfahren

Der Maschinenhersteller kann den Schalldruckpegel seiner Maschine in seinem Prüffeld oft nur unter idealisierten Bedingungen (kein Vollastverhalten oder Originalproduktzufuhr) messen. Nach Inbetriebnahme der Maschine in den Räumen des Betreibers wird der Schallpegel als Raumschalldruckpegel erstmals unter realen Betriebsbedingungen gemessen. Ist dieser zu hoch, besteht die Grundlage eines Konflikts. Der Hersteller beruft sich auf die genormte „Freifeldmessung“ und es ist schwierig, die Ursache für Abweichungen zu finden. Daher sind für Zentrifugen genauere und objektivere Meßverfahren wünschenswert. Einen Ausweg aus dieser Problematik bietet das Schallintensitätsverfahren.

### 4.1 Grundlagen der Schallintensitätsmessung

Bei Schallmessungen in Räumen tritt der Energiefluß des Schalls von 2 Seiten durch eine Hüllfläche, der primäre Schall wird an den Wänden eines Hindernisses teilweise reflektiert und fällt von der rückwärtigen Richtung wieder durch die Fläche (s. Abb. 10). In schallharten Räumen stellt sich ein diffuses Schallfeld ein, in dem an jeder Stelle nahezu der gleiche Schalldruck herrscht. Um den Einfluß der reflektierten Schallwellen (Sekundärschall) und der Schall-

Abbildung 10.  
Schematische Darstellung des Schallflusses nach [5].

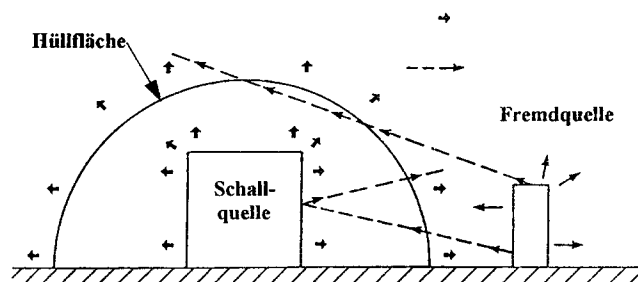
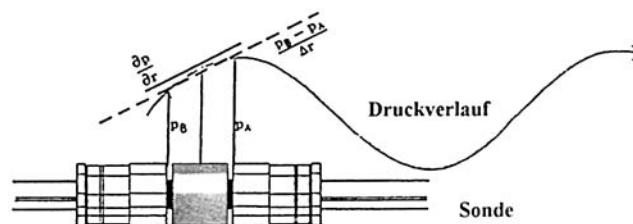


Abbildung 11.  
Messung des Druckgradienten mit einer Zweimikrofonsonde aus [5].



wellen von Fremdquellen zu erfassen, sind Schallmeßsonden mit einer Richtcharakteristik entwickelt worden (s. Abb. 11). Hiermit ist es möglich, die von der Rückseite in eine Fläche einfallenden Schallwellen meßtechnisch vom Primärschall zu unterscheiden und den Einfluß zu korrigieren.

### 4.2 Wirkungsweise der Zweimikrofonsonde

Physikalisch ist nur der Schalldruck, z. B. mit Mikrofonen meßbar. Zur direkten Intensitätsmessung ist die Bestimmung der Schallschnelle  $v$  und deren Ausbreitungsrichtung erforderlich. Diese hängt mit dem Druckgradienten über die Eulersche Bewegungsgleichung (18) zusammen. Der Druckgradient, also die Steigung an die örtliche Druckschwankung, wird über zwei Druckmikrofone (A, B) in einem frequenzabhängig definierten räumlichen Abstand  $\Delta r$ , z. B.  $\Delta r = 12 \text{ mm}$  (für 200 bis 5000 Hz), gemessen. Der Druckgradient ist näherungsweise Differenzdruck geteilt durch den Mikrofonabstand (s. Abb. 11).

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \approx -\frac{p_B - p_A}{\rho \Delta r} \quad (18)$$

Die Schallintensität wird durch eine elektronisch ausgeführte zeitliche Integration ermittelt.

$$I = \frac{p_B - p_A}{2 \rho \Delta r} \int_0^t (p_B - p_A) dt \quad (19)$$

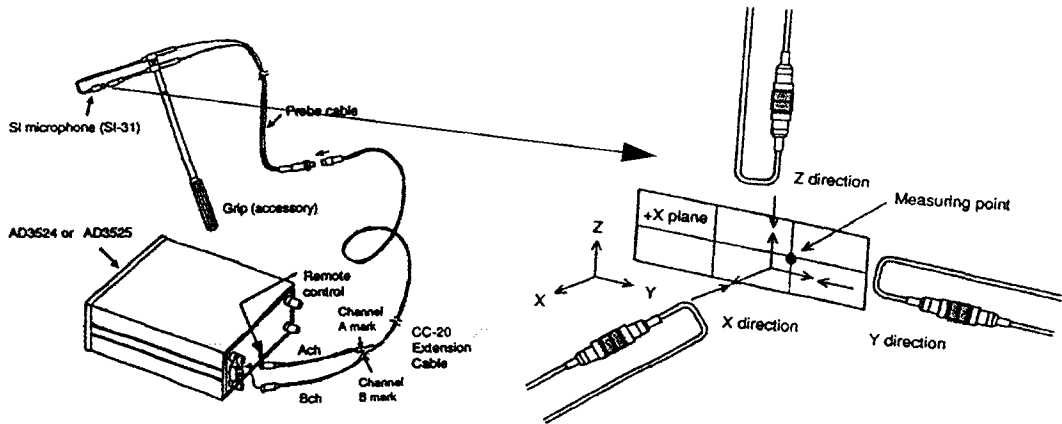
Die Schalleistung ergibt sich wiederum durch Multiplikation der Schallintensität mit der Meßfläche:

$$P = I S \quad (20)$$

oder in Pegelschreibweise:

$$L_W = L_I + L_S \quad (21)$$

Abbildung 12.  
Meßanordnung mit Zweimikrofonsonde und FFT-Analysator aus [6].



Da die Schallintensität dem Schalldruck unter Freifeldbedingungen entspricht, sind keine weiteren Korrekturen erforderlich.

### 4.3 Durchführung der Schallintensitätsmessung

Die verwendete Meßkette zur Schallintensitätsmessung besteht aus der beschriebenen Zweimikrofonsonde und aus einem Zweikanal-FFT-Analysator (s. Abb. 12). Die Mikrofone der Sonde sind über ein Pistonfon kalibrierbar. Um stochastische Schwankungen auszugleichen, ist es sinnvoll, eine Mittelungszeit von 150 ms einzustellen. Die tiefen Frequenzen (unter 300 Hz) werden über ein Tiefpaßfilter ausgeblendet.

Die Abbn. 13, 14 und 15 zeigen das Ergebnis einer Schallintensitätsmessung an einer Zentrifuge, die in einem Betriebsraum mit Hintergrundgeräuschen aufgenommen

wurden. Die Diagramme lassen sich direkt mit der installierten Grafiksoftware des FFT-Analysators aus den Meßwerten erzeugen und ausdrucken.

Abbildung 14.  
Betrag der Schallintensität als Flächendarstellung „surface plot“.

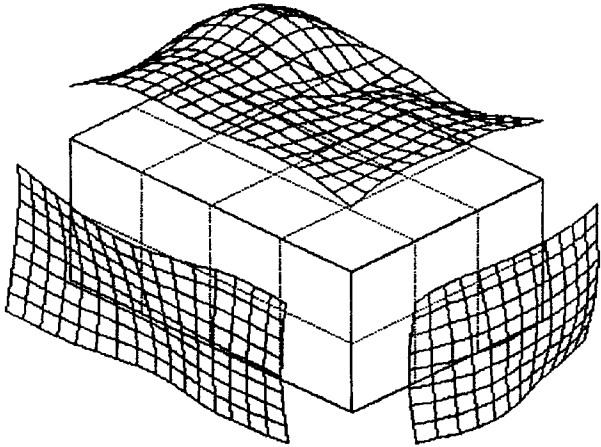


Abbildung 13.  
Linien gleicher Schallintensität (Isintensitätslinien) als „contour plot“ auf der Meßfläche einer Zentrifuge. Die Intensitätswerte an den Meßpunkten entsprechen den Schalldruckwerten einer Freifeldmessung.

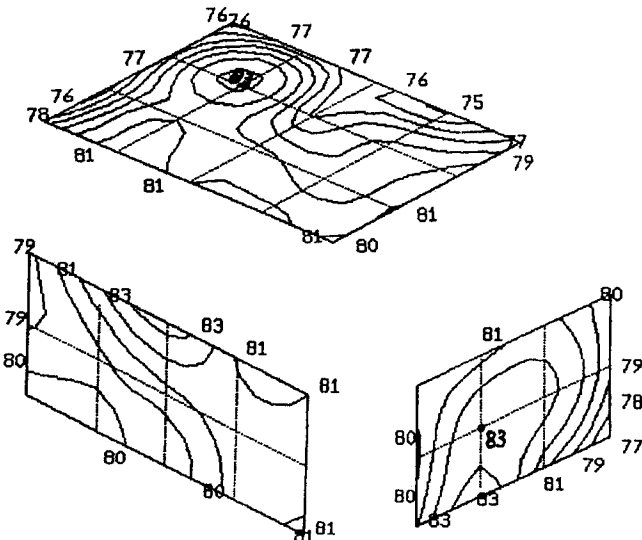


Abbildung 15.  
Darstellung des Schallflusses mit den Schallintensitätsvektoren als „vector plot“.

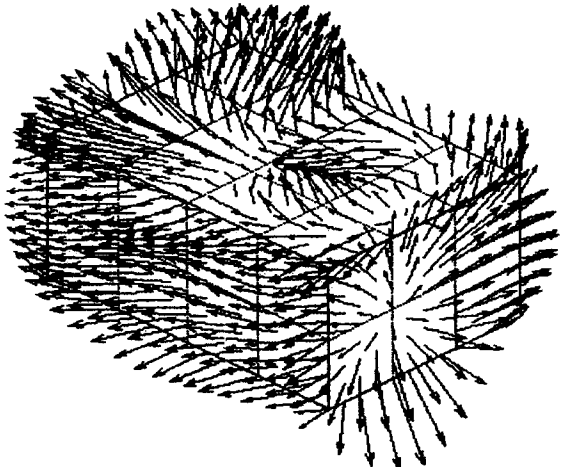


Tabelle 4.  
Vor- und Nachteile der beiden Schalleistungsermittlungsverfahren.

	Hüllflächenverfahren	Schallintensitätsverfahren
Vorteile:	einfache Meßtechnik genormtes Verfahren	genaues Meßverfahren beliebige Umgebungen Nahfeldmessungen möglich gute grafische Darstellung
Nachteile:	aufwendige Korrekturen nur Frequenzgemisch meßbar ungenau Meßwerte keine Nahfeldmessung mögl.	(noch) keine abschl. Normung aufwendige Meßsonde Zweikanal-Analysator erforderlich lange Meßzeiten

In Abb. 13 sind die unterschiedlichen Schallintensitäten als Konturlinien dargestellt. Man bekommt so einen Eindruck, an welchen Stellen der Maschine eine besonders hohe Schallabstrahlung stattfindet. Außerdem sind Schallquellen und Schallsenken gut zu erkennen.

Die Intensitätspegelwerte entsprechen den Schalldruckpegelwerten einer Freifeldmessung. Die Korrekturen der Schalldruckpegel wie bei der Hüllflächenmethode sind nicht mehr erforderlich. Einen besonders plastischen Eindruck von der Höhe der Schallabstrahlung vermittelt die räumliche Flächendarstellung der Schallintensität in Abb. 14.

Wird die Schallintensität in allen drei Raumrichtungen gemessen, läßt sich der Intensitätsvektor räumlich darstellen (s. Abb. 15). Dadurch werden die Hauptrichtungen (Schallfluß) der Schallausbreitung sichtbar. Diese Darstellung gibt Hinweise, an welchen Stellen Teilkapselungen sinnvoll sein können.

gel liegen, nicht mehr wahrgenommen. Die Ermittlung des Bauteiles oder Aggregates mit der höchsten Schalleistung ist sinnvoll nur mit der Schallintensitätsmeßmethode möglich, da hierzu eine Nahfeldmessung erforderlich ist und die Richtungen des Schallflusses aus den Intensitätsvektoren ablesbar sind.

Insgesamt sind die höheren Investitionskosten für die Schallintensitätsmessung durch den Wegfall der Korrekturen, die Möglichkeit auch in Betriebsräumen zu messen, die genaueren Meßergebnisse und dem höheren Informationsgehalt der Messungen schnell wieder zurückgeflossen. Der FFT-Analysator ist als Universalgerät außerdem für weitere Diagnosezwecke an rotierenden Maschinen, etwa für Schwingungsmessungen, wie die Modalanalyse und Ordnungsanalyse einsetzbar.

Eingegangen am 20. April 1995 [B 1911]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vor- und Nachteile der Schalleistungsermittlung nach dem Hüllflächenverfahren und der Schallintensitätsmessung sind in Tab. 4 noch einmal gegenübergestellt.

Die Bestimmung des Schalleistungspegels als maschinenspezifische Schallemissionsgröße erfordert bei Anwendung des Hüllflächenverfahrens Korrekturen, die über Vorversuche ermittelt werden müssen. Durch die direkte Messung der Schallintensität entfallen die Korrekturen und es ist möglich, die Schalleistung schnell in beliebigen Betriebsräumen mit Schallreflektion an den Wänden und Hintergrundgeräuschen zu messen.

Wenn Schallminderungsmaßnahmen an Maschinen durchgeführt werden sollen, muß zunächst das Aggregat oder die Stelle der Maschine ausfindig gemacht werden, die den höchsten Schalleistungspegel aufweist. Aufgrund des Überdeckungseffektes des menschlichen Ohres werden Schallquellen, die 3 dB tiefer als der höchste Schallpe-

Literatur

[1] Lärmarm Konstruieren – Allgemeine Grundlagen. VDI 3720, VDI-Verlag, Düsseldorf 1980.

[2] Geräuschmessung an Maschinen, DIN 45 635, Teil 1: Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Beuth-Verlag, Berlin 1980.

[3] ISO 9614, Entwurf 12/93, Teil 1.

[4] KARGER, M. Maschinenakustik Seminarunterlagen, Bielefeld 1992.

[5] Schallintensität, Firmenschrift der Fa. Brüel & Kjaer, Naerum, Dänemark 1991.

[6] Operational Manual, Handbuch für FFT-Analysator der Fa. Sonic+AND, 1992.

[7] HERING, E.; MARTIN, R.; STÖHRER, M. Physik für Ingenieure, 3. Aufl. VDI-Verlag, Düsseldorf 1989.

[8] VEIT, I. Technische Akustik, Vogel-Verlag Würzburg 1974.

[9] ISO 9614, Entwurf 04/95, Teil 2.