

Einleitung

Mit der Veröffentlichung von Lord Rayleighs Abhandlung "The Theory of Sound" wurde bereits im vergangenen Jahrhundert der Grundstein für die moderne Akustik gelegt. Zentraler Punkt dieser Arbeit war die Bestimmung der physikalischen Größe "Sound Intensity", Schallintensität. Es klaffte dann noch lange Zeit eine Lücke zwischen Theorie und Praxis. Erst seit wenigen Jahren ist es möglich, die Größe Schallintensität direkt zu messen.

Die Möglichkeit, akustische Größen meßtechnisch zu erfassen, eröffnete sich erst mit der fortschreitenden Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronik, z.B. durch die Erfindung des Triodenverstärkers durch L. de Forest im Jahre 1906 und das erste, 1915 von E.C. Wentz entwickelte Kondensatormikrofon. Der erste Versuch, ein Schallintensitätsmeßgerät zu konstruieren, wurde von H.F. Olson 1932 unternommen. Das Gerät arbeitete allerdings nur unter idealisierten Meßbedingungen und war daher nicht praxistauglich. Aus demselben Grund scheiterten auch verschiedene andere Versuche, ein brauchbares Schallintensitätsmessgerät herzustellen.

Erst 45 Jahre später wurde die Schallintensität als Meßgröße wieder interessant, als F.J. Fahy und J.Y. Chung 1977 die neu zur Verfügung stehenden, digitalen Signalverarbeitungsverfahren auf die Schallintensitätstheorie anwandten.

Seitdem hat sich die Schallintensitätsmessung rasch als zuverlässiges Meßverfahren etabliert, nicht zuletzt auch aufgrund der erheblichen Fortschritte bei der Mikrofonherstellung. Erstmals können Schallintensitätswerte nicht nur theoretisch errechnet, sondern auch praktisch gemessen werden.

Schalldruck und Schalleistung

Eine Schallquelle emittiert Schalleistung und erzeugt dadurch einen bestimmten Schalldruck. D.h. Schalleistung ist die Ursache, Schalldruck die Wirkung. Ein Vergleich aus der Wärmelehre macht den Zusammenhang deutlich: Die von einem elektrischen Heizofen abgegebene Wärme bewirkt, daß sich eine bestimmte Temperatur t im Raum einstellt. Wie hoch die Temperatur ist, hängt von der Raumgröße, der Art der Isolierung, dem Vorhandensein anderer Wärmequellen usw. ab. Die Wärmeleistung des elektrischen Heizofens ist jedoch immer die gleiche, praktisch unabhängig vom Raum, in dem er sich befindet.

Beim Schall verhält es sich ähnlich: der Schalldruck, den wir wahrnehmen (oder mit einem Mikrofon messen), ist abhängig vom Abstand zur Schallquelle und von den akustischen Eigenschaften des Raums, in dem sich die Schallwellen ausbreiten. In einem großen, mit schallabsorbierendem Material ausgekleideten Raum hört sich eine Maschine leiser an als in einem kleinen Raum mit nackten Betonwänden. Die Schalleistung der Maschine ist jedoch immer die gleiche.

Zur Beurteilung der Lärmbelastung am Arbeitsplatz ist die Messung des Schalldrucks durchaus sinnvoll. Hier ist nur entscheidend, daß ein bestimmter Grenzwert nicht überschritten wird. Der Einfluß der Umgebungsbedingungen ist von untergeordneter Bedeutung.

Anders verhält es sich bei Messungen zur Bestimmung der Schalleistung einer Maschine. Hier wird eine Meßgröße benötigt, die unabhängig von den Umgebungsbedingungen ist und in direkter Beziehung zur Schalleistung steht - die Schallintensität.

Was ist Schallintensität?

Jede Maschine, die vibriert, strahlt Schallenergie ab. Die Rate, mit der die Schallenergie abgestrahlt wird, ist die Schalleistung (= Energie pro Zeiteinheit). Die Schallintensität beschreibt den Energiefluß im Raum, d.h. die Energie, die pro Zeiteinheit eine senkrecht zur Abstrahl-

richtung stehende Einheitsfläche passiert. Die Dimension der Schallintensität ist "Energie pro Zeit und Fläche" bzw. "Leistung pro Fläche" und wird in W/m^2 angegeben.

Im Gegensatz zum Schalldruck, der als skalare Größe nur einen Betrag hat, besitzt die Schallintensität als vektorielle Größe sowohl einen Betrag, als auch eine Richtung. Man kann daher mit einer Schallintensitätssonde die Richtung des Energieflusses bestimmen und eine Schallquelle orten. Ein weiteres Merkmal der Schallintensität ist, daß nur der zeitlich gemittelte Netto-Energiefluss erfasst wird. Hin- und herwandernde Schallenergie z.B. bei stehenden Wellen wird nicht gemessen, weil sie keine sich ausbreitende Energie darstellt.

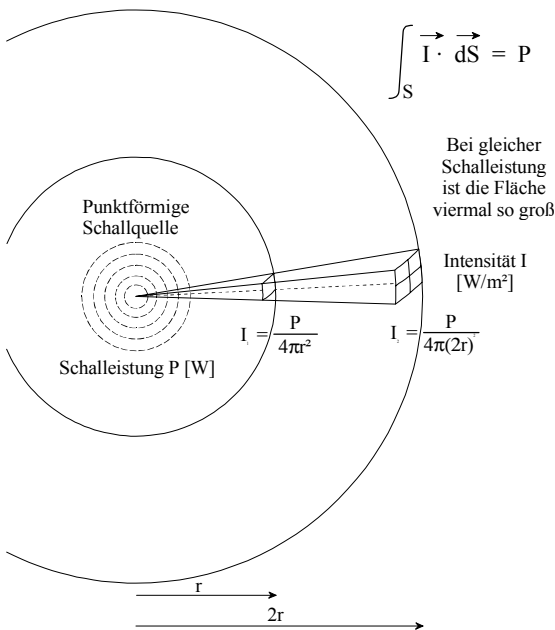


Bild 1 Schallintensität gleich Schalleistung pro Einheitsfläche

Die in der Abbildung dargestellte punktförmige Schallquelle strahlt Schallenergie ab. Diese Energie durchdringt eine "gedachte" Hüllfläche, die die Schallquelle umschließt. Da die Schallintensität als Leistung pro Einheitsfläche definiert ist, läßt sich aus ihr leicht die Schalleistung berechnen: Die über die gesamte Hüllfläche in Abstrahlrichtung gemessene, räumlich gemittelte Schallintensität wird lediglich mit der Größe der Hüllfläche multipliziert. Die kugelförmige Hüllfläche ist bei einem Abstand von $2r$ von der Schallquelle bereits viermal so groß wie bei einem Abstand von $1r$. Da die abgegebene Leistung unabhängig vom Abstand von der Schallquelle ist, muß die Schallintensität abnehmen: I_2 beträgt bei $2r$ nur noch ein Viertel von I_1 .

Warum Schallintensität messen?

Um die Lärmbelastung in einer Fabrikhalle beurteilen zu können, mißt man den Schalldruckpegel am Arbeitsplatz. Stellt sich dabei heraus, daß die zulässigen Grenzwerte überschritten werden, müssen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Dazu ist es erforderlich, die Schalleistung jeder einzelnen Maschine zu bestimmen, um festzustellen, welche Maschine am lautesten ist. Der nächste Schritt ist dann, an der betreffenden Maschine diejenigen Komponenten aufzuspüren, die am meisten Schall abstrahlen.

Dazu eignen sich besonders Schallintensitätsmessungen. Früher war es nur möglich, den Schalldruck zu messen, der aber von den akustischen Umgebungsbedingungen abhängig ist. Die Schalleistung einer Maschine läßt sich daher nur dann aus gemessenen Schalldruckwerten berechnen, wenn der Meßraum genau definierte akustische Eigenschaften besitzt, wie z.B. ein reflexionsarmer Raum oder ein Hallraum (s. DIN 45635). Läßt sich eine Messung nur vor Ort vornehmen, so müssen u.U. Meßgenauigkeiten in Kauf genommen werden.

Die Schallintensität dagegen läßt sich in jeder Umgebung messen, unabhängig von den akustischen Eigenschaften des jeweiligen Raums. Maschinen oder einzelne Maschinenkomponenten können direkt vor Ort gemessen werden, selbst wenn sich andere Geräuschquellen in der Nähe befinden. Stationäre Hintergrundgeräusche haben keinen Einfluß auf die Intensitätsmessung und die daraus gewonnenen Schalleistungswerte.

Da die Schallintensität als vektorielle Größe sowohl Betrag als auch Richtung besitzt, eignet sie sich sehr gut zur Schallquellenlokalisierung.

Das Schallfeld

Ein Schallfeld ist ein Gebiet, in dem Schall auftritt. Es wird charakterisiert durch die Umgebung sowie die Art und Weise, wie sich die Schallwellen in ihm fortbewegen.

Das Freifeld

Unter dem Begriff "Freifeld" versteht man die Schallausbreitung im idealisierten freien Raum, in dem die Schallwellen nirgendwo reflektiert werden. Solche Bedingungen finden sich nur im Freien (in einiger Entfernung vom Boden, der ja auch reflektiert) oder in einem schalltoten Raum. Charakteristisch für die Schallausbreitung im Freifeld ist die Abnahme des Schalldruckpegels und des (in Ausbreitungsrichtung gemessenen) Intensitätspegels um 6 dB bei einer Verdoppelung des Abstandes von der Schallquelle. Dies ergibt sich aus dem Entfernungsgesetz. Die Schalleistungsbestimmung unter Freifeldbedingungen ist in ISO 3745 festgelegt.

Das Diffusfeld

Ein diffuses Schallfeld entsteht, wenn der Schall in einem Raum so oft reflektiert wird, daß der Schalldruckpegel praktisch an jeder Stelle des Raums gleich ist. Ein solches Schallfeld wird in einem Hallraum angestrebt. Obgleich der Betrag der Schallintensität Null ist, läßt sich doch ein Zusammenhang zwischen dem Schalldruck und der einseitig gerichteten Schallintensität I_x - einer rein theoretischen Größe - herstellen. I_x ist die Schallintensität in einer bestimmten Richtung, wenn die entgegengesetzt wirkende, gleichstarke Intensitätskomponente nicht berücksichtigt wird. Diese Größe läßt sich mit einem Schallintensitätsanalysator nicht messen, ist aber insofern von Bedeutung, als sich über sie die Schalleistung aus gemessenen Schalldruckwerten bestimmen läßt. Dieses Verfahren ist in DIN 45635 T2 und ISO 3741 beschrieben.

Aktive und reaktive Schallfelder

In einem aktiven Schallfeld breitet sich Schallenergie aus, in einem reaktiven Schallfeld nicht: Die Energie wandert hin und her, sie ist wie in einer Feder gespeichert. Der Netto-Energiefluß (und damit die Schallintensität) ist Null. Im allgemeinen besteht ein Schallfeld aus aktiven Schallanteilen (Wirkanteil) und aus reaktiven (Blindanteil). Schalldruckmessungen zur Schalleistungsbestimmung führen in schlecht definierten Schallfeldern zu unzuverlässigen Ergebnissen, da der Blindanteil des Nahfelds keinen Beitrag zum Fernfeld leistet. Wir können allerdings die Schallintensität messen, die nur den tatsächlichen Energiefluß berücksichtigt. Zwei Beispiele für reaktive Schallfelder:

Stehende Wellen in einer Röhre

Der hin- und herbewegte Kolben an dem einen Ende der Röhre erzeugt Druckschwankungen und somit Schallwellen, die am Ende der Röhre reflektiert werden. Durch Überlagerung der ankommenden und der reflektierten Schallwellen entsteht eine stehende Welle mit Druckminima und -maxima. Wird die gesamte Schallenergie am Röhrenende reflektiert, so ist die Schallintensität Null. Ist das Röhrenende schallabsorbierend, so läßt sich eine bestimmte Schallintensität feststellen. Stehende Wellen bilden sich z.B. in Räumen bei tiefen Frequenzen.

Das Nahfeld einer Schallquelle

Im Nahfeld einer Schallquelle verhält sich die Luft wie ein Feder-Masse-System, das Energie speichert: Schallenergie zirkuliert, ohne sich auszubreiten. Im Nahfeld läßt sich die Schalleistung nur anhand von Intensitätsmessungen bestimmen. Messungen im Nahfeld haben den Vorteil, daß sich ein besserer Nutz/Störabstand ergibt.

Schalldruck und Schallschnelle

Wenn ein Luftteilchen aus seiner ursprünglichen Position verdrängt wird, führt dies zu einem zeitweisen Druckanstieg. Der Druckanstieg bewirkt, daß das benachbarte Luftteilchen ebenfalls aus seiner Ausgangsposition gedrängt wird, während das erste Luftteilchen versucht, wieder seine ursprüngliche Position einzunehmen. Diese zyklische Druckzu- und -abnahme bildet eine Schallwelle, die sich im Raum ausbreitet. Zwei physikalische Größen charakterisieren diesen Vorgang: der Schalldruck, d.h. die dem Luftdruck überlagerten, örtlichen Druckschwankungen, und die Schallschnelle, d.h. die Geschwindigkeit, mit der die Luftteilchen um ihre mittlere Position oszillieren. Schallintensität ist das Produkt von Schalldruck und Schallschnelle, ist also Schalleistung pro Einheitsfläche:

$$\text{Intensität} = \text{Druck} \cdot \text{Schnelle} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \cdot \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Fläche}}$$

In einem aktiven Schallfeld sind Druck und Schnelle in Phase, d.h. die Druckmaxima fallen zeitlich mit den Schnellemaxima zusammen. Das Produkt aus Druck und Schnelle ergibt die momentane Intensität, die über die Zeit zu einem einzelnen Wert gemittelt wird. In einem rein reaktiven Schallfeld sind Druck und Schnelle außer Phase, d.h. Druck- und Schnellemaxima sind um 90° gegeneinander verschoben. Die sich ergebende Kurve für die momentane Schallintensität schwankt sinusförmig um den Nullpunkt, die über die Zeit gemittelte Intensität ist daher Null. In einem diffusen Schallfeld schwankt die Phasenverschiebung beliebig, so dass die zeitlich gemittelte Intensität ebenfalls Null ist.

Wie wird Schallintensität gemessen?

Die Eulersche Gleichung zur Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit

Schallintensität ist das zeitlich gemittelte Produkt von Druck und Schnelle. Um den Schalldruck zu messen, genügt ein einziges Mikrofon. Schwieriger ist es, die Schallschnelle zu bestimmen. Sie läßt sich allerdings über die linearisierte Eulersche Gleichung auf den Druckgradienten (d.h. die Rate, mit der sich der augenblickliche Schalldruck mit der Entfernung ändert) zurückführen. In der Praxis wird der Druckgradient durch zwei dicht nebeneinander montierte Mikrofone bestimmt, die jeweils den Schalldruck messen. Daraus wird die Schallschnelle berechnet.

Die Eulersche Gleichung ist im Prinzip die von Newton formulierte mechanische Grundgleichung, angewandt auf eine Flüssigkeit. Die mechanische Grundgleichung stellt eine Beziehung her zwischen der Beschleunigung, die eine Masse erfährt, und der Kraft, die auf die Masse einwirkt. Sind Kraft und Masse bekannt, so läßt sich daraus die Beschleunigung errechnen. Durch Integration der Beschleunigung über die Zeit erhält man die Geschwindigkeit.

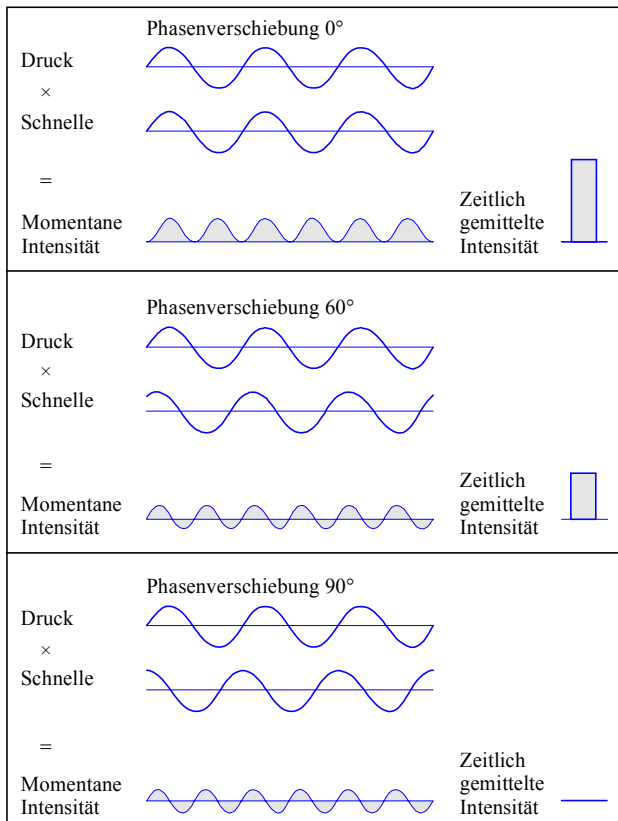


Bild 2 Schalldruck, -schnelle und -intensität

In der Eulerschen Gleichung ist es der Druckgradient, der eine Flüssigkeit der Dichte ρ beschleunigt. Sind Druckgradient und Dichte bekannt, so läßt sich die Teilchenbeschleunigung berechnen. Durch Integration der Teilchenbeschleunigung erhält man die Teilchengeschwindigkeit.

Das Näherungsverfahren zur Druckgradientenbestimmung

Der Druckgradient ist eine kontinuierliche Funktion, eine sich gleichmäßig ändernde Kurve. Mit zwei dicht nebeneinander montierten Mikrofonen ist es möglich, den Druckgradienten durch lineare Näherung (Approximation) zu bestimmen, indem die Differenz der Schalldrücke in Punkt A und B durch den Abstand Δr der Meßpunkte geteilt wird.

Die Berechnung der Schallintensität

Um die Schallschnelle zu erhalten, wird der Druckgradient über die Zeit integriert. Der berechnete Wert gilt für das akustische Zentrum der Schallintensitätssonde, d.h. die Mitte zwischen den beiden Mikrofonen. Der mittlere Schalldruck, der aus den Schalldrücken der beiden Mikrofone berechnet wird, bezieht sich ebenfalls auf diesen Punkt. Das über die Zeit gemittelte Produkt von Schalldruck und Schnelle ergibt die Schallintensität.

Ein System zur Schallintensitätsanalyse besteht aus einer Sonde und einem Analysator. Mit der Sonde werden die unterschiedlichen Schalldrücke bei Mikrophon A und B erfaßt. Die weiteren mathematischen Berechnungen zur Bestimmung der Schallintensität werden vom Analysator durchgeführt. Die mathematischen Gleichungen selbst sind nichts Neues. Neu ist die Anwendung moderner Signalverarbeitungsverfahren, die sich dieser mathematischen Gleichungen bedienen. Die Intensitätsberechnung kann auf zwei Arten erfolgen: durch digitale oder analoge Integratoren und Filter, oder durch einen FFT-Analysator. Bei der FFT-Analyse wird die Intensität auf den Imaginärteil des Kreuzspektrums der beiden Mikrofonensignale bezogen. Beide mathematischen Verfahren führen zum gleichen Ziel - der Bestimmung der Schallintensität.

Die Schallintensitätssonde

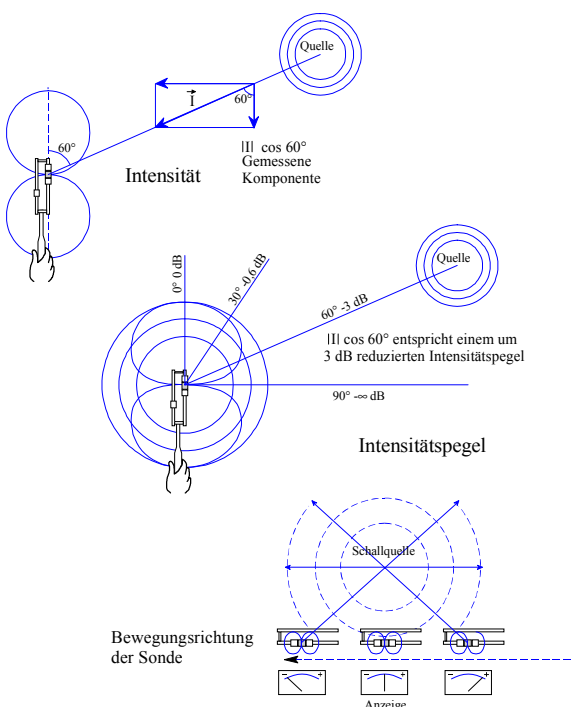


Bild 3 Richtcharakteristik der Schallintensitätssonde

Eine Brüel & Kjær - Schallintensitätssonde besteht aus zwei einander gegenüberliegenden Mikrofonen, die ein Distanzstück voneinander trennt. Die Anordnung hat sich anderen Mikrofonpositionen in Frequenzgang und Richtcharakteristik überlegen erwiesen. Da der Mikrofonabstand den Frequenzbereich der Sonde bestimmt, stehen Distanzstücke in drei verschiedenen Längen (6, 12 und 50 mm) zur Verfügung. Zur Messung tieferer Frequenzen dienen $\frac{1}{2}$ "-Mikrofone, für höhere Frequenzen $\frac{1}{4}$ "-Mikrofone.

Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik der Sonde hat (in der zweidimensionalen Ebene) die Form einer Acht und wird als Kosinus-Charakteristik bezeichnet. Sie ergibt sich aus der Sonden-geometrie und den Berechnungen durch den Analysator.

Da der Schalldruck eine skalare Größe ist, sollten die Mikrofone in alle Richtungen gleich

empfindlich sein, also Kugelcharakteristik besitzen. Die Schallintensität dagegen ist eine vektorielle, d.h. gerichtete Größe. Mit der Sonde messen wir allerdings nicht den Vektor, sondern lediglich die Vektorkomponente in Richtung der Sondenachse. Der vollständige Intensitätsvektor entsteht aus den Komponenten für alle drei Raumrichtungen.

Trifft der Schall im Winkel von 90° auf die Sonde, so ergibt sich keine Intensitätskomponente in Richtung der Sondenachse: Die Mikrofone werden gleichzeitig von den Schalldruckschwankungen getroffen, Schnelle und damit auch Schallintensität sind Null. Stimmen Schalleinfallrichtung und Sondenachse überein, so wird die volle Intensität gemessen. Für alle anderen Einfallswinkel θ ergibt sich in Richtung der Sondenachse eine reduzierte Schallintensität von $|I| \cos\theta$, daher die Bezeichnung "Kosinus-Charakteristik".

Pegel und Bezugswerte

Die Größen Schalldruck, Intensität, Leistung und Schnelle werden in der Regel als Pegel angegeben (in dB = Dezibel) und mit L_p , L_I , L_W und L_U bezeichnet. Unter dem Begriff "Pegel" wird das logarithmierte Verhältnis von gemessenem Wert zu einem genormten Bezugswert verstanden. Als Bezugswert für den Schalldruckpegel ist zum Beispiel ein Bezugsschalldruck festgelegt worden, der ungefähr der Hörschwelle des menschlichen Gehörs entspricht.

Die anderen Bezugswerte sind über die Beziehungen zwischen Druck, Schnelle und Intensität definiert. Im freien Schallfeld ergeben sich, gemessen in Ausbreitungsrichtung, für Schalldruck, Intensität und Schnelle dieselben Pegelwerte. Theoretisch sind die Werte nicht genau gleich, weil die festgelegten Bezugswerte gerundet sind. Wie groß die tatsächliche Differenz ist, hängt von der akustischen Impedanz (ρc) des Mediums ab, in dem sich der Schall ausbreitet. ρ ist die Dichte, c die Schallgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium. Für das Medium "Luft" ist diese Abweichung allerdings in der Regel vernachlässigbar klein, es sei denn, die Messung erfolgt in größerer Höhe über dem Meeresspiegel.

Im freien Schallfeld ergeben sich für den Schalldruckpegel und den Schallintensitätspegel, gemessen in Ausbreitungsrichtung, die gleichen Werte. Hier ist die Messung speziell der Intensität also nicht erforderlich. Meist finden wir aber keine Freifeldbedingungen vor, d.h. es ergibt sich eine mehr oder weniger große Differenz zwischen Schalldruckpegel und Schallintensitätspegel, die als Druck-Intensitäts-Index bezeichnet wird.

Einige Rechenbeispiele

1. Ein Rasenmäher emittiert eine Schalleistung von 0,01 Watt. Wie hoch sind Schalldruck- und Intensitätspegel in 1,5m Entfernung? Da sich der Rasenmäher im Freien befindet, setzen wir Freifeldbedingungen voraus. Darüber hinaus nehmen wir vereinfachend an, daß der Untergrund schallreflektierend ist. Der Schall wird also halbkugelförmig über eine Fläche von $2\pi r^2$ abgestrahlt. Bei $r = 1,5$ m beträgt die Fläche 14 m^2 . Somit ergibt sich eine Schallintensität von $I = 0,01/14 \text{ W/m}^2$ bzw. ein Intensitätspegel von $10 \lg(I/I_0) = 88,5\text{dB re } 1 \text{ pW/m}^2$. Aufgrund der Freifeldbedingungen gilt für den Schalldruckpegel der gleiche Wert, nämlich $88,5\text{dB re } 20\mu\text{Pa}$.
2. Zwei Pegel sind zu addieren, 80 dB und -80 dB. Wie hoch ist der Gesamtpegel? Hier ist Vorsicht geboten! Ein negativer Pegel bedeutet, daß der Intensitätswert kleiner als der Bezugswert ist. Das Minuszeichen sagt nichts über die Schallrichtung aus! Der Gesamtpegel ist 80dB, da -80dB einen vernachlässigbar kleinen Intensitätswert darstellt, der praktisch nicht vorkommt.
3. Zwei Personen stehen einander gegenüber und sprechen miteinander. Es soll der Gesamtintensitätspegel bestimmt werden, wenn beide gleichzeitig sprechen. Intensitätspegel können nicht einfach addiert werden. Wie also wird vorgegangen? In diesem Fall spielt die Ab-

strahlrichtung eine Rolle. Sprecher 1: Der Pegel der nach rechts abgestrahlten Intensität beträgt 70 dB. Sprecher 2: Der Pegel der in entgegengesetzter Richtung abgestrahlten Intensität beträgt 67 dB. Aus der Differenz der Intensitätswerte läßt sich der von der Sonde gemessene Intensitätspegel zwischen den beiden Sprechern berechnen:

$$I = 10 \lg \left(10^{\frac{70}{10}} - 10^{\frac{67}{10}} \right) = 67 \text{ dB (nach rechts gerichtet).}$$

Schalleistungsbestimmung aus Intensitätswerten

Die Bestimmung der Schalleistung aus Intensitätspegeln ermöglicht Messungen auch im Nahfeld oder bei Vorhandensein stationärer Fremdgeräusche. Zudem ist es sehr einfach: Die Schalleistung ergibt sich durch Multiplikation der in Abstrahlrichtung über die gesamte Meßfläche gemessenen und gemittelten Schallintensität mit der Größe der Meßfläche. Die Meßfläche ist eine gedachte Hüllfläche um die Schallquelle, auf der die Meßpunkte liegen.

Die Form der Meßfläche ist ohne Bedeutung, solange sich keine Fremdgeräuschquellen oder schallabsorbierenden Flächen in ihr befinden. Der Boden wird als schallreflektierend vorausgesetzt und ist daher nicht Teil der Meßfläche. Der Abstand der Meßfläche von der Schallquelle kann theoretisch beliebig gewählt werden. Drei Beispiele für mögliche Messflächenformen:

Der Quader. Form und Größe sind beliebig. Die Meßfläche ist leicht zu berechnen, und die ebenen Flächen erleichtern die Messung genau entlang der Quaderkonturen. Die Gesamtschalleistung ergibt sich durch Addieren der für jede Teilfläche ermittelten Werte.

Die Halbkugel. Diese Form erfordert die wenigsten Meßpunkte. Für eine Schallquelle mit gleichmäßiger Schallabstrahlung in alle Raumrichtungen ergibt sich im Freifeld an jedem Punkt der Halbkugel der gleiche Intensitätspegel. Nach ISO 3745 sind Messungen an mindestens zehn Meßpunkten durchzuführen.

Die konturgetreue Meßfläche. Sie ermöglicht Nahfeldmessungen mit einem besseren Nutz-/Störabstand und Rückschlüsse auf den spezifischen Ort der Schallabstrahlung.

Räumliche Mittelung

Die Messung der Schallintensität erfolgt senkrecht zur Meßfläche. Die Fläche kann durch ein Meßgitter definiert sein oder durch vorgegebene Abstandswerte von bestimmten Bezugspunkten. Um für jede Seite der Hüllfläche einen Mittelwert zu erhalten, sind zwei Verfahren zur räumlichen Mittelung möglich:

Kontinuierliches Überstreichen der Meßfläche

Bei dieser Methode wird die Sonde über die Meßfläche geführt, als ob eine Fläche bemalt würde. Dazu ist eine ausreichend lange Mittelungszeit zu wählen. Das Ergebnis ist ein einziger, räumlich gemittelter Intensitätswert. Multipliziert man diesen Wert mit der jeweiligen Flächengröße, so erhält man die abgestrahlte (Teil-)Schalleistung. Die Gesamtschalleistung ergibt sich durch Addition der für jede Meßflächenseite ermittelten Schalleistungswerte.

Die punktweise Messung

Bei der zweiten Mittelungsart wird die Meßflächenseite in einzelne Segmente aufgeteilt und die Schallintensität in jedem Segment gemessen. Ein Meßgitter aus Draht oder Bindfaden hilft, die Abstände zwischen den Meßpunkten genau einzuhalten. Zur Ermittlung der Schalleistung werden die in den einzelnen Segmenten gemessenen Werte gemittelt und mit der Flächengröße der betreffenden Meßflächenseite multipliziert. Die Gesamtschalleistung ergibt sich durch Addition der Teilbeträge für jede Meßflächenseite.

Die Messung durch Überstreichen der Meßfläche ist sehr genau, erfordert aber eine gleichmäßige Sondenbewegung über die gesamte Fläche. Die punktweise Messung dagegen ist sehr gut reproduzierbar.

Hintergrundgeräusche - ein Problem?

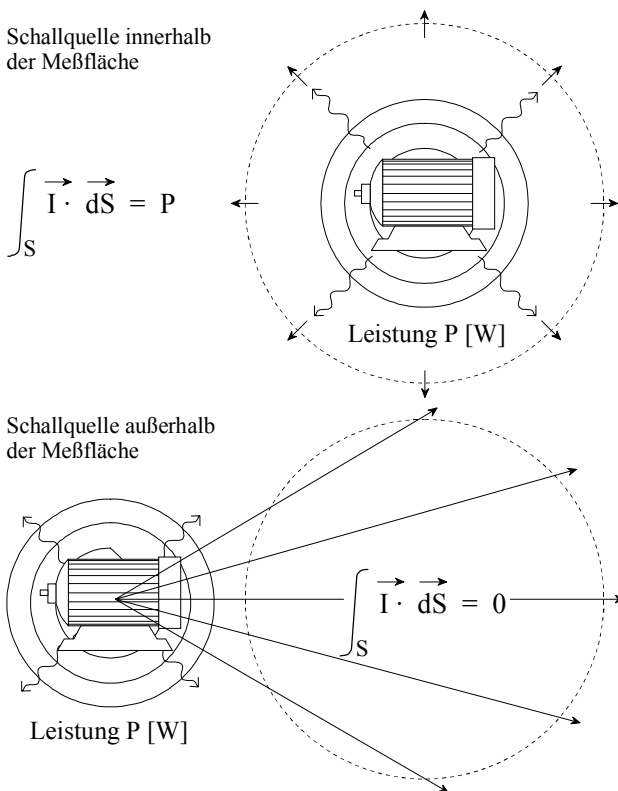


Bild 4 Schallquelle und Hintergrundgeräusche

Intensitätsmessung nicht beeinflussen. In der Praxis ist es möglich, selbst bei Fremdgeräuschen, die 10dB höher als der Pegel der zu messenden Schallquelle sind, die Schalleistung auf 1 dB genau zu bestimmen.

Voraussetzung ist allerdings, daß das Fremdgeräusch stationär ist. Es darf nicht zeitlich schwanken. Geringe zeitliche Pegelschwankungen können jedoch durch eine längere Mittelungszeit "geglättet" werden. Außerdem ist es wichtig, daß keine Schallabsorption in der Meßfläche stattfindet. In die Meßfläche eindringende und austretende Schallenergie hebt sich sonst nicht auf, es entsteht ein falsches Meßergebnis.

Messung von Teilschallquellen

Kompliziertere Maschinen bestehen aus vielen Bauteilen, die Schall abstrahlen oder absorbieren. Für gezielte Maßnahmen zur Geräuschreduzierung ist es daher wichtig, die Schalleistung der einzelnen Bauteile, die als Teilschallquellen wirken, zu bestimmen.

Dies ist bei der Schallintensitätsmessung kein Problem, da wir eine Meßfläche definieren können, die nur die betreffende Maschinenkomponente umschließt. Alle anderen schallabstrahlenden Maschinenteile stellen dann Hintergrundgeräusche dar, die, solange sie stationär sind, die Messung nicht beeinflussen. Die Gesamtschalleistung läßt sich durch Addition der Schalleistungswerte der einzelnen Komponenten leicht errechnen. Die Abbildung rechts zeigt die Meßergebnisse einer Detailanalyse an einer Kettensäge. Untersucht wurden nur die Bauteile, die im Verdacht standen, besonders stark Schall abzustrahlen. Wie das Diagramm zeigt, müßten in erster Linie die Rück- und die Unterseite, der Lufteinlaß sowie das Schwert konstruktiv geändert werden, um eine signifikante Geräuschreduzierung zu erzielen.

Ein entscheidender Vorteil der Schalleistungsbestimmung aus Intensitätswerten ist, daß Messungen selbst bei starken stationären Hintergrundgeräuschen möglich sind. Das folgende Beispiel erläutert das.

Wir definieren zunächst eine Meßfläche im Raum, beispielsweise eine Kugel. Befindet sich eine Schallquelle in der Kugel, so können wir durch Intensitätsmessungen über die gesamte Kugeloberfläche die mittlere Intensität ermitteln. Durch Multiplikation mit der Kugeloberfläche erhalten wir die abgestrahlte Schalleistung.

Befindet sich dieselbe Schallquelle außerhalb der kugelförmigen Hüllfläche, so messen wir keinerlei Intensität. Denn die von außen in die Kugel eindringenden Schallwellen verlassen sie wieder in gleicher Richtung an anderer Stelle. Dadurch heben sich bei der räumlichen Mittelung die Intensitätswerte der eindringenden und der austretenden Schallwellen auf. Schallquellen außerhalb der Meßfläche können also eine

Gerade bei der Messung von Teilschallquellen zeigen sich die Vorzüge der Intensitätsmess-technik. Die Messung kann vor Ort erfolgen. Spezielle Meßräume wie ein Hallraum oder ein schalltoter Raum sind nicht erforderlich. Das Meßobjekt, z.B. ein Bauteil eines größeren Dieselmotors, braucht nicht mehr wie bei der konventionellen Schalldruckmessung mit schallisolierendem Material gegen Fremdgeräusche von anderen Teilschallquellen abgeschirmt zu werden. Es werden Zeit und Kosten gespart.

Schallintensitätskarten

Konturenbilder und 3D-Intensitätskarten

Konturenbilder und 3D-Intensitätskarten zeigen anschaulich die Schallabstrahlung einer Schallquelle. So können z.B. Teilschallquellen bzw. absorbierende Flächen genau geortet werden.

Die einzelnen Meßwerte für die Intensitätskarten werden durch punktweise Messung senkrecht zur Meßfläche gewonnen, siehe auch "Räumliche Mittelung". Sie werden jedoch nicht wie für die Schalleistungsberechnung räumlich gemittelt (was zusätzlich möglich ist), sondern als Datensatz (Matrix der Intensitätswerte) gespeichert. Jedem Meßpunkt ist ein Intensitätswert zugeordnet. Die Messwertmatrix kann jetzt auf verschiedene Arten graphisch dargestellt werden, z.B. als Konturenbild. Es besteht aus Isointensitätslinien, also Linien gleicher Schallintensität, die durch Interpolation und Verbinden der Matrixpunkte gleicher Schallintensität erzeugt werden. Konturenbilder lassen sich für einzelne Frequenzbänder oder für Breitband-Intensitätspegel erstellen. Zusätzlich können Bilder negativer Schallintensitäten ausgedruckt werden, um schallabsorbierende Flächen zu lokalisieren.

Derselbe Datensatz kann auch benutzt werden, um eine dreidimensionale (3D-)Intensitätskarte zu erstellen, die besonders anschaulich das Schallfeld der Schallquelle darstellt. Hier werden die Intensitätswerte für die einzelnen Meßpunkte auf der vertikalen Z-Achse aufgetragen, während X- und Y-Achse die Meßfläche repräsentieren. Auch in dieser Darstellungsform können sowohl positiv-gerichtete, wie auch negativ-gerichtete Intensitätskomponenten dokumentiert werden. Wegen der umfangreichen Berechnungen und Datenmengen sind für die 3D-Kartierung Zusatzgeräte erforderlich. Die Abbildungen zeigen als Meßbeispiel einen Drucker mit Meßgitter und die Meßergebnisse als Konturenbild und 3D-Intensitätskarte. Der meiste Schall wird an der Papier-Austrittsöffnung und an der Aussparung für den Schalter (unten rechts) abgestrahlt.

Konturbilder und 3D-Karten können natürlich auch für Schalldruckwerte erstellt werden. Sie haben aber eine deutlich geringere Auflösung als Darstellungen von Intensitätswerten. Dies liegt daran, daß Intensitätsmessungen im Gegensatz zu Schalldruckmessungen auch noch im Nahfeld gemacht werden können. Der Abstand zwischen Meßpunkt und Abstrahlort ist daher sehr gering. Darüber hinaus lassen sich mit Intensitätsmessungen schallabsorbierende Flächen oder Teilschallquellen lokalisieren, unabhängig von den akustischen Eigenschaften der räumlichen Umgebung.

Schallquellenortung

Mit diesem Verfahren können Schallquellen schnell und direkt vor Ort lokalisiert werden. Schall, der in einem Winkel von 85° zur Sondenachse gemessen wird, wird vom Analysiersystem als positiv-gerichtete (von vorne kommende) Schallintensität interpretiert, während Schall, der in einem Winkel von 95° auf die Sonde trifft, als negativ-gerichtete (von hinten kommende) Intensität registriert wird.

Zur Schallquellenortung wird die Sonde parallel zur Meßfläche bewegt und dabei die Anzeige beobachtet. Ein plötzliches Umspringen der Richtungsanzeige von positiv nach negativ signa-

lisiert, daß die Sonde gerade die Schallquelle passiert. Bei einer Vielzahl dicht nebeneinander liegender, ungefähr gleich starker Teilschallquellen oder bei Vorhandensein absorbierender Flächen ist dieses Verfahren nicht anwendbar.

Schallintensitätsmessungen in der Bauakustik

Messung der Luftschalldämmung

Die in DIN 52210 und ISO 140 beschriebene Methode zur Bestimmung der Luftschalldämmung basiert auf Schallpegelmessungen. Doch auch in der Bauakustik bieten sich Schallintensitätsmessungen an: Größen wie das Schalldämmmaß R oder der Schallabsorptionsgrad α sind physikalisch über Schalleistung/Schallintensität definiert. So ist auch hier Schallintensität die Größe, die gemessen werden sollte, z.B. bei der Messung der Luftschalldämmung.

Das Schalldämmmaß eines Bauelementes kann im Labor oder vor Ort gemessen werden. Im Senderraum wird anhand von Schalldruckmessungen der räumlich gemittelte Schalldruckpegel gemessen. Im Empfangsraum wird über die Meßfläche ein Meßgitter definiert. Mit einem Schallintensitäts-Analysesystem wird der gemittelte Schallenergiefluss durch jedes Segment des Meßgitters direkt gemessen. Die je Segment emittierte Schalleistung ergibt sich aus der jeweils gemittelten Schallintensität, multipliziert mit der Segmentfläche.

Da der Schallintensitätsfluss durch jede Fläche im Raum untersucht werden kann, ist es möglich, den Beitrag der verschiedenen Flankenübertragungen und akustischen Lecks zur Gesamtschalleistung des Empfangsraums zu messen.

Ein bedeutender Vorteil der Intensitätsmessung ist, daß das bewertete Schalldämmmaß R'_n für jede beliebige Fläche im Meßgitter bestimmt werden kann. So kann für Wände, die aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt sind, z.B. für eine Wand mit einem Fenster, sowohl für das Material der Mauer als auch für das Fensterglas R'_n bestimmt werden.

Meßausstattung

Die wesentlichen Komponenten eines Schallintensitäts-Analysesystems sind die Sonde, ein Analysator und ein Kalibrator. Brüel & Kjær bietet verschiedene Intensitäts-Systeme und Systemkomponenten an sowie Software-Pakete zur Datenverarbeitung (z.B. zur graphischen Darstellung).

Der Analysator

Sie können zwischen zahlreichen verschiedenen Intensitäts-Analysatoren von Brüel & Kjær für den Einsatz vor Ort oder im Labor wählen. Der Analysator 2133 z.B. ist ein Echtzeitanalysator mit parallelen, digitalen Filtern für die Analyse in Oktav-, Terz- und 1/12-Oktavbändern. Zweikanalanalysatoren wie z.B. der 2032 berechnen über die FFT-Analyse Kreuzspektren und daraus Intensität in Schmalbändern. Für Messungen vor Ort bieten sich tragbare Analysatoren an. Der Typ 4437 ist hier eine wirtschaftliche Lösung. Er mißt Intensität in Oktavbändern, arbeitet mit Batteriebetrieb und ist überall vor Ort einsetzbar.

Die Schallintensitätssonde

Brüel & Kjær stellt verschiedene Intensitätssonden her, die alle mit zwei Mikrofonen arbeiten, z.B. Typ 3520, 3545, 3547 und 3548. Mit einer Fernbedienung kann die Mittelung von der Sonde aus gesteuert werden.

Der Schallintensitätskalibrator

Der Schallintensitätskalibrator 3541 erzeugt in einem kleinen Kuppler bekannte Druck-, Intensitäts- und Schnellepegel. Er dient zu Amplitudenkalibrierungen der zwei Mikrofonkanäle

und zur Prüfung der vom Analysator berechneten Intensitäts- und Schnellewerte. Der 3541 kann darüber hinaus zur Bestimmung der Remanenzintensität eines Analysesystems eingesetzt werden und damit zur Bestimmung des Druck-Remanenzintensitätsindex, der ein Maß für die Phasenfehlانpassung des Systems ist (siehe Anhang).

Durchführen der Messungen

Es existieren bisher keine Normen für Intensitätsmessungen. Daher werden hier einige wichtige Punkte, die bei Schallintensitätsmessungen zu beachten sind, kurz erläutert.

Kalibrierung vor Ort

Die beiden Mikrofone werden nacheinander mit einem Pistonphon oder gleichzeitig mit einem Pistonphon und einem Kuppler amplitudenkalibriert. Die angezeigte Intensität wird mit dem bekannten Intensitätspegel eines Schallintensitätskalibrators verglichen. Für die Luftdichte muß ein Korrekturwert in die Berechnung der Schallintensität eingehen, der jedoch nur in großen Höhen nennenswert ist. Der Schallintensitätskalibrator kann zusätzlich über den Druck-Intensitätsindex die Phasenانpassung eines Analysesystems prüfen und so die Dynamik des Systems bestimmen, siehe auch „Querfeldunterdrückung und Dynamik“.

Zeitliche Mittelung

Zur Minimierung des statistischen Fehlers ist eine ausreichend lange Mittelungszeit erforderlich. Die optimale Mittelungszeit bestimmen Sie durch wiederholte Messungen mit immer längerer Mittelungszeit, bis die Ergebnisse reproduzierbar sind.

Räumliche Mittelung

Bei der räumlichen Mittelung durch Überstreichen der Meßfläche muß die Sonde gleichmäßig über die gesamte Fläche gestrichen werden. Bei der punktwisen Messung hängt die Anzahl der Meßpunkte von den Schwankungen der Intensitätswerte ab. Bei starken Schwankungen sind für eine bessere Auflösung mehr Meßpunkte erforderlich. Eine räumliche Mittelung ist korrekt durchgeführt worden, wenn sich auch bei anders gewählter Meßfläche (oder bei anders gewählten Meßpunkten auf derselben Meßfläche) derselbe Mittelwert ergibt.

Fremdgeräusche

Selbst bei 10dB höheren Fremdgeräuschen kann der Pegel des Meßobjekts noch auf 1 dB genau bestimmt werden, vorausgesetzt, das Fremdgeräusch ist stationär. Im Zweifelsfall ermittelt man den Einfluß des Fremdgeräusches dadurch, daß man die zu messende Schallquelle abschaltet und die Messung wiederholt. Fremdgeräusche werden stärker unterdrückt, wenn man direkt an der Schallquelle misst.

Distanzstücke

Distanzstücke stehen in drei Längen zur Verfügung: 6, 12 und 50 mm. Generell gilt: Je kleiner das Distanzstück, desto höher die obere Frequenzgrenze. Umgekehrt gilt: Je größer das Distanzstück, je geringer die Phasenfehlانpassung des Systems und der Druck-Intensitätsindex, desto tiefer die untere Frequenzgrenze.

Die Abbildung auf der gegenüberliegenden Seite kann zur Bestimmung der Frequenzgrenzen eingesetzt werden. Dazu muss zunächst der Druck-Intensitätsindex zur Beschreibung des Schallfeldes bestimmt werden. Er ist die Differenz von Intensitäts- und Schalldruckpegel. Eine weitere Einflussgröße für die untere Frequenzgrenze ist die Phasenfehlانpassung des Systems. Eine konservative Schätzung hierzu für Brüel&Kjær - Intensitätsmessgeräten ist +0,3°. Angenommen wir machen Messungen in einem Schallfeld mit einem Druck-Intensitätsindex von -3 dB. Die Sonde sei mit ½" Mikrofonen ausgerüstet. Laut Diagramm beträgt die untere Frequenzgrenze mit dem 12 mm-Distanzstück 250 Hz. Mit dem 50 mm-Distanzstück dagegen

kann bis hinunter zu 63 Hz gemessen werden. Die obere Frequenzgrenze sinkt dadurch allerdings auf 1,25 kHz. Es ist also nicht möglich, mit einem Distanzstück den Frequenzbereich von 63 Hz bis 5 kHz abzudecken. Näheres zu diesem Problem finden Sie im Anhang.

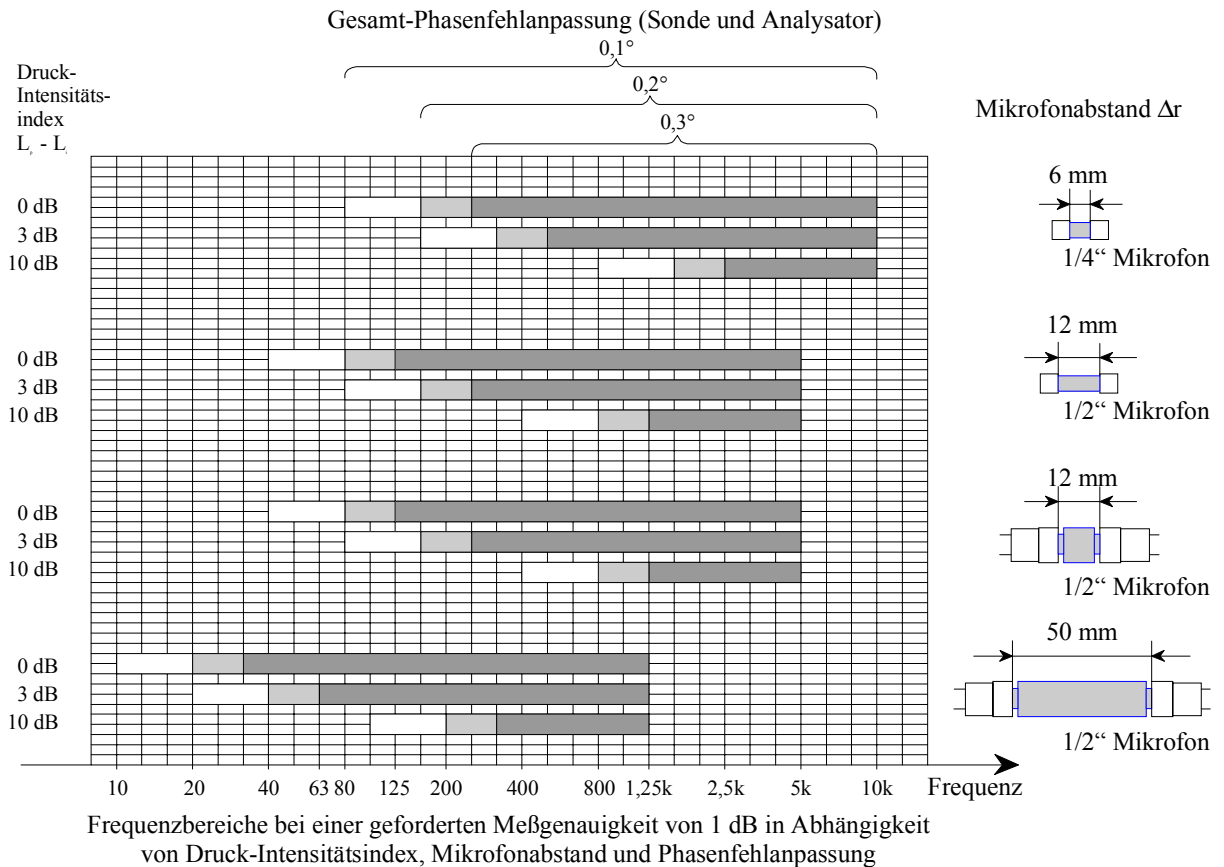


Bild 5 Bestimmung der Frequenzgrenzen

Weitere Anwendungen, spezielle Meßtechnik

Intensitätsspektrum eines Zeitsignalausschnitts

Häufig soll die Geräuschabstrahlung einer Maschine zu einem bestimmten Zeitpunkt des Bewegungsablaufs untersucht werden. Um in einem solchen Fall eine zeitliche Mittelung vornehmen zu können, muß dem Analysator ein stationäres Signal "vorgetäuscht" werden. Dies erreicht man dadurch, daß die Messungen immer wieder am gleichen Punkt des Bewegungsablaufs durch einen fotoelektrischen Abtaster ausgelöst ("getriggert") werden. Mit der Spektrumanalyse eines Signalausschnitts kann z.B. der Zündvorgang in einer Verbrennungsmaschine oder ein zyklisch wiederkehrendes Geräusch bei einer Produktionsmaschine detailliert untersucht werden. Prinzipiell ist dieses Verfahren sowohl für Intensitäts- wie auch für Schalldruckmessungen anwendbar. Die Intensitätsmessung erlaubt allerdings zusätzlich die Schallquellenortung anhand der Meßergebnisse.

Bestimmung des Abstrahlgrades

Der Abstrahlgrad σ gibt an, in welchem Maße die mechanischen Schwingungen der Oberfläche eines Strahlers die umgebende Luft zu Schwingungen anregen. Diese Größe charakterisiert das Abstrahlverhalten einer Schallquelle und wird in der Entwicklung zur Abschätzung der zu erwartenden Schalleistung eingesetzt. Die Gleichung lautet $\sigma = P_s / (\rho c S_s v^2)$. P_s ist die von der schwingenden Körperoberfläche abgestrahlte Schalleistung, die mit einem Intensitätsanalysator direkt bestimmt werden kann. S_s ist die Größe der schwingenden Oberfläche. Bei bekannter Luftdichte und Schallgeschwindigkeit muß also lediglich noch die Schwing-

schnelle ermittelt werden. Dies kann mit einem Beschleunigungsaufnehmer mit nachgeschaltetem Integrator erfolgen (s. auch DIN 45635, Teil 8).

Direkte Bestimmung der Intensitätsvektoren

Die heute üblichen Intensitätssonden messen nur die Vektorkomponente in Richtung der Sondenachse. Mit einer Anordnung von drei Mikrofonpaaren ist es möglich, die Komponenten in X-, Y- und Z-Richtung simultan zu messen sowie Betrag und räumliche Lage des Vektors mit einem Computer zu berechnen.

Intensitätsmessung von Körperschall

Mit zwei Mikrofonen können wir die Intensität von Luftschall messen. In ähnlicher Weise ist es mit einer aus zwei Beschleunigungsaufnehmern bestehenden Körperschall-Sonde möglich, die Ausbreitung von Körperschall in großen, geräuschabstrahlenden Strukturen zu verfolgen.

Schallintensität in Lüftungskanälen

Die Intensitätsmesstechnik ermöglicht es, den Energiefluß in Lüftungskanälen zu verfolgen und die Schalleistung zu bestimmen. Messungen sind auch während des Betriebs möglich, wenn die Strömungsgeschwindigkeit nicht zu hoch ist und ein Windschirm benutzt wird.

Räumliche Schallfeldtransformation (STSF)

Durch Korrelieren der Ergebnisse von dicht an einer Maschine durchgeführten Schalldruckmessungen mit Meßergebnissen, die an bestimmten Bezugspunkten im Raum gewonnen wurden, läßt sich ein Schallfeld nicht nur in der Meßebene, sondern in jeder beliebigen Entfernung von der Schallquelle bestimmen. Es ist also möglich, Schalldruck- und Intensitätswerte in einer bestimmten Entfernung vom Meßobjekt vorherzusagen, ohne tatsächlich an dieser Stelle Messungen durchzuführen.

Fallstudien

Im folgenden wird anhand von zwei praktischen Beispielen gezeigt, wie Geräuschprobleme durch Intensitätsmessungen einfacher und schneller gelöst werden können.

Fall 1: Geräuschmessungen an einer Pumpeneinheit

Eine elektromotorisch angetriebene Pumpe erzeugte hohe Betriebsgeräusche. Die gesamte Pumpeneinheit wurde daraufhin in einen Hallraum transportiert und der Schalleistungspegel anhand von Schalldruckmessungen bestimmt: Mit 88,4 dB war der Pegel eindeutig zu hoch. Nach Entkuppeln der Pumpe ergab sich ein Pegel von 65 dB für den Elektromotor. Das Problem war also scheinbar die Pumpe.

Die Messungen wurden allerdings nicht unter Betriebsbedingungen gemacht. Die einzige Möglichkeit, nach der konventionellen Schalldruckmethode nur die Pumpe unter Betriebsbedingungen zu messen, hätte darin bestanden, den Motor (sowie alle Zusatzaggregate) schalldicht zu kapseln. Dies wäre nicht nur sehr aufwendig gewesen, sondern hätte auch nur bedingt brauchbare Meßergebnisse geliefert, da improvisierte Kapselungen den Schall meist nur unzureichend dämmen. Zur Kontrolle der Meßergebnisse wurde jetzt die Schallintensität gemessen. Intensitätsmessungen ermöglichen es, einzelne Baugruppen einer Maschine separat und direkt vor Ort zu messen - ohne Eingriffe, während des Betriebs und ohne spezielle Meßräume. Da die Pumpeneinheit sich allerdings bereits im Hallraum befand, wurde sie für die Messung dort belassen.

Um die Schalleistung bestimmen zu können, wurden zuerst die Meßflächen festgelegt. Als Hüllfläche wurden zwei Quader gewählt; ein größerer, der den Motor und den Ölbehälter umschloß, und ein kleinerer für die Pumpe. Zur genauen Definition der Meßpunkte wurde ein

Fadenmessgitter benutzt. Da die Gefahr bestand, daß Raumreflexionen die Messung beeinflussen könnten, wurden die Quader so klein wie möglich gewählt, so daß sich ein günstigerer Stör/Nutzabstand ergab.

Für jeden der beiden Quader wurde die Schalleistung getrennt ermittelt. Dabei stellte sich heraus, daß der Elektromotor mit 86,7 dB mehr Schall abstrahlte als die Pumpe (83,5dB). Schalldruckmessungen hätten dieses Ergebnis nur mit der bereits erwähnten Kapselung erzielt.

Die hohe Geräuschabstrahlung des Motors lag daran, daß über die Kupplung Vibrationen von der Pumpe übertragen wurden, die die großflächigen und damit besonders stark schallabstrahlenden Oberflächen des Motors und des Ölbehälters zu Schwingungen anregten. Als geräuschreduzierende Maßnahme wurde der Ölbehälter separat aufgestellt und damit akustisch vom Motor entkoppelt. Zu dieser Problemlösung hätte man auch durch Erfahrung oder Probieren finden können. Aber die Intensitätsmessung lieferte den sofortigen und eindeutigen Nachweis.

Es ist beachtenswert, daß die Messungen sehr genaue Ergebnisse lieferten, obwohl sie in einem diffusen Schallfeld mit einer großen Differenz zwischen Schalldruck und Schallintensität (Druck-Intensitätsindex) vorgenommen wurden.

Fall 2: Lokalisierung der Schallübertragungswege in einem Gebäude

Schall kann auf verschiedenen Wegen in Gebäude eindringen, nicht nur direkt durch Fenster oder Wände. Häufig gelangt er über flankierende Bauteile oder durch Lüftungskanäle von Klimaanlage in die einzelnen Zimmer. Ungeeignete Baumaterialien oder Ritzen in Tür- und Fensterrahmen öffnen ebenfalls Schlupflöcher für Schallwellen. Mit der konventionellen Meßmethode (Schalleistungsquelle im Senderaum, räumliche Mittelung der im Empfangsraum gemessenen Schalldruckpegel) läßt sich zwar die Gesamtschalldämmung zwischen zwei Räumen bestimmen, nicht aber, über welche Pfade der Schall vom Senderaum in den Empfangsraum gelangt. Darüber hinaus können stehende Wellen die Meßergebnisse verfälschen.

Durch Schallintensitätsmessungen ist es möglich, gezielt an bestimmten Stellen einer Wand die abgestrahlte Schalleistung zu bestimmen. Oder Konturbilder der Schallabstrahlung der gesamten Wand zu erstellen, um festzustellen, wo die Schallübertragung am größten ist. Eine andere Möglichkeit, Schallübertragungswege zu orten, ist das Abtasten des Schallfeldes mit der Sonde dicht an der Wand (siehe auch Schallquellenortung).

In einem Reihenhaushaus wurde hierzu eine kurze Untersuchung durchgeführt: In dem einen Raum wurde eine Schallquelle aufgestellt, im Nachbarraum die Schalleistung in an der Wand markierten Segmenten gemessen. Um aussagefähige Meßresultate zu erhalten, wurden die Raumreflexionen reduziert. Schallabsorbierende Schaumstoffblöcke drückten die Nachhallzeit auf ungefähr 0,5 Sekunden.

Die Meßergebnisse waren überraschend. Die höchsten Pegel wurden ganz auf der linken Seite der Wand gemessen, die gar keinen direkten Kontakt zum Nachbarraum hatte, sondern die Außenwand zum Garten hin bildete (siehe Abb.). Eine Kontrollmessung des Schallpegels vor dem Gebäude bestätigte, daß der Schall nicht von außerhalb in den Raum gedrungen sein konnte, sondern als Körperschall über flankierende Bauteile in den Empfangsraum übertragen worden war.

Grund für die unterschiedliche Schallübertragung waren die verwendeten Materialien. Die linke Seite der Wand war zur besseren Wärmedämmung aus Leichtbeton-Lochsteinen gemauert, während der Rest der Wand aus Beton bestand. Die Schalldämmeigenschaften von Leichtbeton sind aber aufgrund seiner geringeren Dichte nicht so gut wie die von Beton. Dieser Schallübertragungsweg wäre durch Schalldruckmessungen nicht aufzuspüren gewesen.

Anhang: Grenzen der Intensitätsmesstechnik

Die obere Frequenzgrenze: Fehler durch lineare Gradientennäherung

Dieser Fehler, der bei der Messung höherer Frequenzen auftritt, wird auch als systematischer Fehler bezeichnet, da er nur von der Höhe der gemessenen Frequenz abhängig ist. Der Fehler entsteht, weil der Druckgradient nur näherungsweise durch die Druckdifferenz der beiden Sondenmikrofone beschrieben wird. Die Abbildung zeigt das Problem: Ist die Wellenlänge groß, so wird durch die lineare Näherung die Steigung der Schalldruckkurve (Druckdifferenz im Abstand Δr) mit guter Genauigkeit erfaßt. Ändert sich die Kurve dagegen innerhalb des Abstands Δr sehr schnell, d.h. ist die Frequenz hoch, dann wird der Druckgradient nur sehr ungenau angenähert. Die Sonde mißt nur die relativ geringe Druckdifferenz, "übersieht" aber den hohen Druckgradienten (steiler Anstieg der Kurve) mitten zwischen den Mikrofonen (siehe Abbildung). Der Fehler tritt dann auf, wenn die Wellenlänge im Verhältnis zum Mikrofonabstand Δr klein ist.

Für einen Mikrofonabstand A_r ergibt sich eine obere Frequenzgrenze, bei deren Überschreitung der Fehler deutlich ansteigt. Als Faustregel gilt: Für eine zulässige Abweichung von < 1 dB muß die Wellenlänge sechsmal größer als der Mikrofonabstand sein. Dies gibt für die einzelnen Distanzstücke folgende Frequenzgrenzen:

50 mm-Distanzstück: bis 1,25kHz

12 mm-Distanzstück: bis 5 kHz

6 mm-Distanzstück: bis 10 kHz

Die untere Frequenzgrenze: Fehler durch Phasenfehlpassung

Die Phasenfehlpassung zwischen den beiden Kanälen des Analysesystems bestimmt die untere Frequenzgrenze. Bislang haben wir mit "Phase" und "Phasenverschiebung" die Verschiebung zwischen Druck- und Schnellexima beschrieben. Hier charakterisieren sie die zeitliche oder räumliche Veränderung einer Schallwellenamplitude. Eine Wellenlänge entspricht einer Rotation von 360° . Der Abstand zwischen den Sondenmikrofonen kann als Bruchteil der Wellenlänge oder als Phasenänderung zwischen den zwei Punkten ausgedrückt werden. Intensität wird unmittelbar durch die Phasenänderung bestimmt. Ohne Phasenänderung findet keine Schallausbreitung statt, es ist keine Intensität feststellbar.

Die Phasenänderung ist gleichbedeutend mit der Zeitspanne, in der die Schallwelle von Mikrofon A zu Mikrofon B gelangt. Diese Zeitspanne ist erforderlich, um die korrekte Intensität zu messen. Aus technischen Gründen ergibt sich aber bei allen Analysesystemen eine geringe Verzögerung zwischen den beiden Kanälen, die eine geringe Phasenänderung bewirkt, die Phasenfehlpassung. Für ein gutes Analysesystem beträgt sie etwa $\leq \pm 0,3^\circ$. Die Phasenfehlpassung ist ein systematischer Fehler, durch den die Intensität je nach Vorzeichen des Phasenfehlpassungswertes unter- oder überbewertet wird. Um den Fehler kleiner als 1 dB zu halten, sollte die Phasenänderung zwischen den Mikrofonen mindestens fünfmal größer als die Phasenfehlpassung sein.

Um den Fehler bei höheren Frequenzen niedrig zu halten, sollte die Wellenlänge sechsmal größer als der Mikrofonabstand sein, so daß die Phasenänderung zwischen den Mikrofonen 60° beträgt. Eine Phasenfehlpassung von $\pm 0,3^\circ$ spielt hier also keine Rolle. Anders sieht es bei tiefen Frequenzen aus. Bei 63 Hz beträgt die Wellenlänge ca. 5,5 m, was bei einem 12mm-Distanzstück nur eine Phasenänderung von $0,8^\circ$ ergibt. Eine Phasenfehlpassung von $\pm 0,3^\circ$ führt in diesem Fall zu einem deutlichen Fehler.

Bei einem 50mm-Distanzstück (ca. 4 x 12mm) beträgt die Phasenänderung $3,3^\circ$ (ca. 4 x $0,8^\circ$), der Fehler ist vernachlässigbar. Für die Messung tieferer Frequenzen wird daher ein längeres

Distanzstück benötigt. Dies gilt nur für die Schallausbreitung entlang der Sondenachse im Freifeld. Bei schrägem Schalleinfall oder in reaktiven oder diffusen Schallfeldern entsteht meist eine geringere Phasenänderung.

Druck-Intensitätsindex und Phase

Wenn Schall in einem Winkel θ auf die Sonde trifft, so reduziert sich die zu messende Phasenänderung, weil nicht der volle Mikrofonabstand, sondern nur dessen Projektion $\Delta r \cdot \cos\theta$ wirksam wird (s. Abb.). Daher wird eine um den Faktor $\cos\theta$ geringere Intensität gemessen. Der Schalldruck als skalare Größe ändert sich dagegen nicht mit dem Einfallswinkel. Es entsteht eine Differenz zwischen Schalldruck- und Intensitätspegel. Der Fehler durch die Phasenfehlانpassung wird größer, der meßbare Frequenzbereich reduziert.

Die Differenz zwischen Schalldruck und Schallintensität tritt auch in reaktiven und diffusen Schallfeldern auf, wo trotz hoher Schalldruckpegel nur geringe Intensitätspegel meßbar sein können. Diese Differenz wird als Druck-Intensitätsindex bezeichnet.

Der Druck-Intensitätsindex ist sehr wichtig für die Beurteilung der Genauigkeit einer Intensitätsmessung, da wir über ihn Rückschlüsse auf die Phasenänderung zwischen den Mikrofonen ziehen können. So können wir feststellen, ob die Phasenfehlانpassung ungenaue Messungen bewirkt. Die Phasenänderung wird in Winkelgraden angegeben und errechnet sich aus nebenstehender Formel. Mit ihr ist bestimmbar, ob die Phasenfehlانpassung verglichen mit der Phasenänderung zwischen den Mikrofonen einen signifikanten Einfluß auf die Messung hat.

Im allgemeinen ist die Phasenänderung an jedem Meßpunkt im Schallfeld anders, der Druck-Intensitätsindex müßte also an jedem Meßpunkt neu bestimmt werden. Oft reicht es allerdings aus, die Meßgenauigkeit aus räumlich gemittelten Schallintensitäts- und Schalldruckwerten zu berechnen.

Querfeldunterdrückung und Dynamik

Die Phasenfehlانpassung ist quantifizierbar. So wie der Druck-Intensitätsindex die Phasenänderung zwischen den Mikrofonen beschreibt, so beschreibt die Querfeldunterdrückung die Phasenfehlانpassung.

Trifft auf beide Sondenmikrofone dasselbe Schallsignal, so sollte im Idealfall keine Intensität meßbar sein. Die Phasenfehlانpassung bewirkt jedoch einen geringen Phasenunterschied zwischen den Signalen, den der Analysator als auf die Sonde wirkende Intensität interpretiert. Diese nur scheinbare Intensität ist mit dem Eigenrauschen vergleichbar und stellt die untere Grenze des Meßbereichs dar. Sie läßt sich nicht als absoluter Wert angeben, da sie vom Schalldruckpegel abhängt. Angegeben werden kann jedoch die Differenz von Intensitäts- und Schalldruckpegel, wenn dasselbe Signal auf beide Mikrofone gleichzeitig wirkt. Die Differenz ist definiert als Querfeldunterdrückung und steht durch die Formel auf der vorigen Seite mit der Phasenfehlانpassung in Beziehung.

Die Querfeldunterdrückung kann mit einem Kuppler gemessen werden, der an beide Mikrofone dasselbe Schallsignal gibt. Um eine Genauigkeit von 1 dB zu erreichen, sollte die Phasenänderung zwischen den Mikrofonen fünfmal größer als die Phasenfehlانpassung sein. Dies entspricht der Forderung, daß der Druck-Intensitätsindex 7dB über der Querfeldunterdrückung liegen muß. Ziehen wir 7 dB von der Querfeldunterdrückung ab, so erhalten wir die nutzbare Geräte-Dynamik, die den maximal meßbaren Druck-Intensitätsindex bestimmt. Mit diesen Parametern können wir jetzt für jedes Distanzstück den Meßbereich in Abhängigkeit von Frequenz und Druck-Intensitätsindex graphisch darstellen, siehe Abbildung. Die obere Grenze ist durch den Fehler bei der Gradientennäherung gegeben.