Güttner, W. (1979): Hörgerätetechnik. Stuttgart: Thieme
Hahlbrock, K. H. (1970): Sprachaudiometrie. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme
Helle, R. (1980): Wiedergabe-Eigenschaften von Hörgeräten in verschiedenen Prüfkammern und im freien Schallfeld. Audiol. Akust. **19**, 4–13 u. 46–60
Helle, R. (1987): Fortschritte bei der Miniaturisierung des Hörgerätes. In Fortschr. d. Akustik. DAGA '87, 115–136. Bad Honnef: DPG
IEC 645-2 (1993): Audiometers. Part 2: Equipment for speech audiometry
Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt (1985): Die Beeinträchtigung der Kommunikation durch Lärm. Z. Lärmbekämpfung **32**, 95–99
ISO 226 (1987): Acoustics – Normal equal-loudness level contours
ISO 389-7 (1993): Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment. Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions
ISO 532 (1975): Acoustics – Method for calculating loudness level
ISO/TR 3352 (1974): Acoustics – Assessment of noise with respect to its effect on the intelligibility of speech
ISO/DIS 4869-2 (1992): Acoustics – Hearing protectors. Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn
ISO/DIS 8253-3 (1993): Acoustics – Audiometric test methods. Part 3: Speech audiometry
ISO/TR 4870 (1991): Acoustics – The construction and calibration of speech intelligibility tests
Katz, J. (Ed.) (1978): Handbook of clinical audiology. 2. Aufl. Baltimore: Williams & Wilkins
Kollmeier, B. (1987): Adaptive AFC-Meßmethoden in der Audiologie. Audiol. Meßtechnik **26**, 169–179
Larsby, B.; Arlinger, S. (1988): Comparison of different types of equipment for insertion gain measurement. In: Proc. 13th. Danavox Symposium, 39–52, Copenhagen
Lehnhardt, E. (1986): Praktische Audiometrie. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme
Martin, M. (Ed.) (1987): Speech Audiometry. London, New York, Philadelphia: Taylor & Francis
Robinson, D. W.; Whittle, L. S. (1973): A comparison of self-recording and manual audiometry. J. Sound Vibr. **26**, 41–62
Sotscheck, J. (1982): Ein Reimtest für Verständlichkeitsmessungen mit deutscher Sprache als ein verbessertes Verfahren zur Bestimmung der Sprachübertragungsgüte. Der Fernmelde-Ing. **36**, 1-84
Steeneken, H. J. M.; Houtgast, T. (1985): RASTI: A tool for evaluating auditoria. Brüel & Kjaer Technical Review No. 3 – 1985, 13–30
VDI 2560 (Dez. 1983): Persönlicher Schallschutz
von Wedel, H.; Kießling, J. (1986): In situ-Messungen zur Auswahl und Anpassung von Hörgeräten. Audiol. Akustik **25**, 2–31
Vorländer, M. (1990): Ein künstliches diffuses Schallfeld zur Messung der Schalldämmung von Gehörschützern in der PTB. Laborbericht-1.51-90-2
Whitham, E. M.; Martin, A. M. (1975): The ISVR facility for the evaluation of hearing protectors following the British standard procedure. Institute of Sound and Vibration Research Memorandum 558. Southampton
Zwicker, E. (1960): Verfahren zur Berechnung der Lautstärke. Acustica **10**, 304–308
Zwicker, E. (1982): Psychoakustik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
Zwicker, E.; Deuter, K.; Peisl, W. (1985): Loudness meters based on ISO 532 B with large dynamic range. Proc. Inter Noise '85. Munich, Vol. II, 111–124
Zwicker, E.; Feldtkeller, R. (1967): Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. Aufl. Stuttgart: Hirzel

2.6 Geräuschmeßtechnik (R. Martin †)

2.6.1 Schallpegelmesser

Geräte zur Messung des Schalldruckpegels werden als Schallpegelmesser bezeichnet. Entsprechende Geräte zur Messung des Schallschnellepegels sind nicht gebräuchlich. Die in früheren Jahren verwendete Bezeichnung DIN-Lautstärkemesser ist nicht zutreffend, da die Geräteanzeige bis zu etwa 15 dB kleiner ist als der Laustärkepegel, und zwar um so mehr, einen je breiteren Frequenzbereich das Geräusch umfaßt. Dieser Unterschied ist hauptsächlich dadurch bedingt, daß der Schallpegelmesser die verschie-

denen Frequenzanteile zu einem Effektivwert zusammenfaßt, während die Zusammenfassung bei der Lautstärkebildung im Bereich der zugehörigen Lautheiten erfolgt (s. 2.5.5).

Die Funktion von Schallpegelmessern kann durch eine Zusammenschaltung aus Mikrofon, Verstärker mit Frequenzbewertung, Gleichrichtung, Zeitbewertung und Anzeige beschrieben werden. Die Anforderungen und Prüfverfahren sind in Normen festgelegt (DIN IEC 651), wobei die Fehlergrenzen vierfach gestuft sind, so daß sich vier Genauigkeitsklassen ergeben. Die Anforderungen gelten für ebene Wellen, d. h. für ein freies Schallfeld. Für Anwendungen in Räumen, insbesondere in Hallräumen (s. 2.1.3), muß das Übertragungsmaß für diffusen Schalleinfall zusätzlich bestimmt werden.

Als Mikrofone werden fast ausschließlich Kondensatormikrofone verwendet, da dieser Mikrofontyp in bezug auf Frequenzbereich und zeitliche Stabilität besonders günstige Eigenschaften besitzt. Die erforderliche Vorspannung kann bei hoher Luftfeuchte und insbesondere bei Kondensation im Mikrofon zu Störungen führen, die sich durch leichtes Aufheizen oder durch Anwendung von Adaptern mit Trockenmitteln vermeiden oder zumindest verringern lassen. Bei der Anwendung im Wind oder in Strömungskanälen entstehen durch Wirbel störende Geräusche, die durch das Aufsetzen von Schaumstoffkugeln oder speziellen Sonden um etwa 10 bis 20 dB verringert werden können. Der Durchmesser des Mikrofons beeinflußt das Übertragungsmaß und die Richtcharakteristik. Je kleiner der Mikrofondurchmesser, desto besser wird die geforderte kugelförmige Richtcharakteristik angenähert. Damit ist jedoch im allgemeinen eine Erhöhung der oberen Grenze des Arbeitsfrequenzbereiches, des höchsten meßbaren Schalldruckes und der unteren Grenze des Meßbereiches sowie eine Verringerung des Übertragungsmaßes verbunden.

Vorzugsweise werden Mikrofone mit einem Durchmesser von 12 mm verwendet. Die Forderung nach kugelförmiger Richtcharakteristik gilt für das gesamte Gerät. Zur Erfüllung dieser Forderung sind, insbesondere bei Geräten einer Klasse hoher Genauigkeit, besondere Gehäuseformen, Verlängerungsstäbe oder Kabel zwischen Mikrofon und Anzeigeteil erforderlich. Die Verwendung eines Kabels ist auch zweckmäßig, um den Einfluß des Beobachters auf das Schallfeld am Ort des Mikrofons zu verringern oder auszuschalten.

Für das Übertragungsmaß des Schallpegelmessers sind besondere Frequenzgänge vereinbart worden, die als Frequenzbewertung A, B, C und D (Fig. 2.7) bezeichnet werden und sich vor allem bei Frequenzen unterhalb von 1000 Hz unterscheiden (DIN IEC 651) (s. Tab. T 2.08 in Band 3).

Der Verlauf der Bewertungen ist durch Pole und Nullstellen festgelegt und verzichtet aus Gründen einer einheitlichen, mit nicht zu großem Aufwand verbundenen Herstellung bewußt auf eine strenge Nachbildung der Kurven gleichen Lautstärkepegels (s. 2.5.5), obwohl diese ursprünglich die Vorlage für die Frequenzbewertungen darstellten. Für Geräuschmessungen wird ausschließlich die Bewertung A angewendet, daher gibt es eine Reihe insbesondere kleinerer Geräte, die nur diese Bewertung enhalten. Die Bewertung D besitzt eine Anhebung im Bereich zwischen 1000 und 5000 Hz um bis zu 11 dB, die aus subjektiven Beurteilungen unter dem Aspekt der Lästigkeit abgeleitet worden ist (IEC 537).

Die Gleichrichtung soll das Quadrat des Signals bilden und zusammen mit der nachfolgenden Zeitbewertung auch dann noch den Effektivwert des Signals liefern, wenn das Signal starke Pegelschwankungen und hohe Impulsspitzen enthält.

Während früher die dynamischen Eigenschaften der Anzeige überwiegend durch das Einschwingverhalten der Drehspulmeßsysteme bestimmt waren, liegen nunmehr den Anforderungen *RC*-Tiefpässe mit bestimmten Zeitkonstanten zugrunde, die zu einer von der Signaldauer abhängigen Anzeige führen. Dieser Vorgang wird als Zeitbewertung bezeichnet. Die Norm (DIN IEC 651) beschreibt die Zeitbewertungen S, F, I, denen die Zeitkonstanten $\tau_1 = 1000$ ms, 125 ms beziehungsweise 35 ms für das *RC*-Glied zugeordnet sind (s. Fig. 2.8). (Für S, F, I hat man früher die Bezeichnungen „Slow", „Fast", „Impulse" verwendet.)

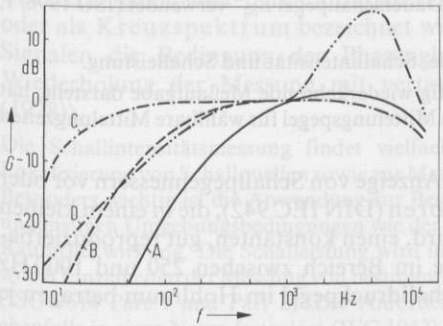

Fig. 2.7 Frequenzbewertungen des Schallpegelmessers (nach DIN IEC 651 und IEC Publication 537) Freifeld-Übertragungsmaß *G* bezogen auf den Wert bei 1000 Hz

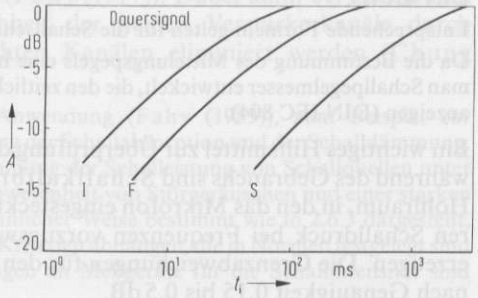

Fig. 2.8 Zeitbewertungen S, F, I des Schallpegelmessers (nach DIN IEC 651). Anzeige von Tonimpulsen der Dauer t_i bezogen auf die Anzeige für das Dauersignal gleicher Amplitude

Die Anforderungen an die Zeitbewertung F werden durch eine weitere Norm (DIN 45657) so ergänzt, daß auch eine definierte Messung sehr kurzer Impulse ermöglicht wird. Um Meßabweichungen durch Übersteuerung einzelner Stufen der Signalverarbeitung zu vermeiden, muß im Gerät eine Übersteuerungsanzeige vorhanden sein. Das ist besonders für die Messung von Schallimpulsen und Impulsfolgen wichtig.

Eine Besonderheit der Zeitbewertung I liegt darin, daß noch eine Spitzenwertanzeige mit einer Abklingzeitkonstante von $\tau_2 = 1500$ ms nachgeschaltet ist, die bei der Bildung von zeitlichen Mittelwerten dazu führt, daß der Mittelungspegel mit der Zeitbewertung I um so mehr über den entsprechenden Mittelungspegeln mit den Zeitbewertungen F und S liegt, je impulshaltiger das Geräusch ist. Diese Differenz wird als Nachweis und Kennwert für die Impulshaltigkeit des Geräusches verwendet. Manche Schallpegelmesser liefern zusätzlich eine Anzeige des Spitzenwertes.

Die Anzeige des Schallpegelmessers kann aus einem Zeigerausschlag, einem optischen Signal, z. B. in Form eines Lichtbandes oder einer Lampenkette, oder aus Ziffern bestehen. Die Meßwerte werden mit Dezibel (dB) bezeichnet und entsprechen der Gl. (2.3). Die Anwendung der Frequenz- und Zeitbewertung muß im Begleittext oder als Index am Formelzeichen angegeben werden, z. B. L_{pAS} für den Schalldruckpegel mit Frequenzbewertung A und Zeitbewertung S.

Bei der Mittelung von Pegeln ist zu beachten, daß nicht die Pegel selbst, sondern die physikalische Größe unter dem Logarithmus gemittelt werden muß (der Index m kennzeichnet den Mittelungsvorgang, der auch als „quadratische" oder „energetische" Mittelung bezeichnet wird (DIN 45641),

z. B. Mittelungspegel für den Schalldruck:

$$L_{pm} = 10\lg\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{p_i^2}{p_0^2}\right)\mathrm{dB} \tag{2.22}$$

Bei der Anwendung von Gl. (2.22) auf Schalldruckpegel L_{pi} wird p_i^2/p_0^2 ersetzt durch $10^{L_{pi}/10\,\mathrm{dB}}$.

In der Integralform lautet die Formel für die zeitliche Mittelung:

$$L_{pm,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\int_0^T\frac{p(t)^2}{p_0^2}\,\mathrm{d}t\right)\mathrm{dB} \tag{2.23}$$

Für $L_{pm,T}$ wird auch die Bezeichnung „äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}" verwendet (ISO 1996/1, DIN 45641).

Entsprechende Formeln gelten für die Schallschnelle, Schallintensität und Schalleistung.

Da die Bestimmung des Mittelungspegels eine häufig wiederkehrende Meßaufgabe darstellt, hat man Schallpegelmesser entwickelt, die den zeitlichen Mittelungspegel für wählbare Mittelungzeiten anzeigen (DIN IEC 804).

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Überprüfung der Anzeige von Schallpegelmessern vor oder während des Gebrauchs sind Schallkalibratoren (DIN IEC 942), die in einem kleinen Hohlraum, in den das Mikrofon eingesteckt wird, einen konstanten, gut reproduzierbaren Schalldruck bei Frequenzen vorzugsweise im Bereich zwischen 250 und 1000 Hz erzeugen. Die Grenzabweichungen für den Schalldruckpegel im Hohlraum betragen je nach Genauigkeit 0,15 bis 0,5 dB.

2.6.2 Schallintensität

Die Schallintensität ist die durch die Einheitsfläche strömende Schalleistung (Fahy (1989), Gade (1982)). Nach der Definition (s. 2.1.1, Gl. (2.6)) sind zur Bestimmung der mittleren Schallintensität sowohl der Schalldruck als auch die Schallschnelle nach Betrag und Phase gleichzeitig zu messen und der zeitliche Mittelwert des Produktes zu berechnen. In ebenen Wellen und in Kugelwellen für $r \gg \lambda/2\pi$ kann man sich auf die Messung von p beschränken, da dort die Beziehung $v = p/\varrho c$ gilt. In vielen praktischen Fällen, in denen der Abstand des Mikrofons von der Schallquelle groß ist gegen die Wellenlänge, können näherungsweise diese Wellentypen angenommen werden, so daß man im allgemeinen mit der Messung von p auskommt. Die Schallkennimpedanz $Z_0 = \varrho c$ (s. 2.1.1) beträgt für Luft der Temperatur 20°C $Z_0 = 416\,\mathrm{Ns/m^3}$. Der Schalldruck bzw. der Schalldruckpegel wird mit Schallpegelmessern gemessen, deren Anzeige mit der Zeitbewertung S bereits einer Mittelung über 2 s entspricht (Randall (1987)).

Ist der Abstand von der Schallquelle nicht groß gegen die Wellenlänge oder sind stehende Wellen vorhanden, müssen zur Messung der Schallintensität p und v getrennt erfaßt werden. Für die Messung von v können Bändchenmikrofone (Baker (1955), Hamann (1980)) oder Hitzdrahtsonden (Zyl u. Andersen (1975)) eingesetzt werden. Ein anderer Weg ist die Berechnung von v aus den Druckgradienten (Schultz (1956), Pavić (1977), Hamann (1980), Fahy (1989)).

$$v(t) = -\frac{1}{\varrho}\int_0^t\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\,\mathrm{d}t \tag{2.24}$$

Der Druckgradient wird aus der Differenz der Ausgangssignale p_1, p_2 zweier Kondensatormikrofone gebildet. Bei einem Mikrofonabstand von $\Delta x = 12\,\mathrm{mm}$ beträgt die obere

Frequenzgrenze etwa 10 kHz. Dabei ist es sehr wichtig, daß die Verstärkung in beiden Mikrofonwegen einschließlich der erforderlichen Filter in Betrag und Phase möglichst genau übereinstimmt. Die Verwendung digitaler Filter ist vorteilhaft.

Die Intensität ergibt sich dann als Mittelwert über die Zeit T

$$I = -\frac{1}{2\varrho\Delta x}\left[(p_1+p_2)\int_0^t (p_1-p_2)\mathrm{d}t\right]^T \tag{2.25}$$

Ein anderer Auswertungsweg führt über die Kreuzkorrelation der Summen- und Differenzsignale und deren Fourier-Transformierte, die als Kreuzspektraldichte oder als Kreuzspektrum bezeichnet wird (Fahy (1977)). Dabei kann bei konstanten Signalen die Bedingung der Phasengleichheit der beiden Verstärkerkanäle durch Wiederholung der Messung mit vertauschten Kanälen eliminiert werden (Chung (1978)).

Die Schallintensitätsmessung findet vielfach Anwendung (Fahy (1989)), zum Beispiel zur Lokalisierung von Schallquellen sowie zur Messung der Schallabsorption und der Schalldämmung. Besonders wichtig ist die Anwendung zur Bestimmung der Schalleistung von Schallquellen unter ungünstigen Umgebungsbedingungen wie der Anwesenheit von Störgeräuschen und einer starken Raumrückwirkung. Die Schalleistung wird in ähnlicher Weise bestimmt wie in 2.6.3 dargestellt, wobei Einzelheiten der Messung von bestimmten Kriterien abhängen, die in Normen festgelegt sind (ISO 9614 Part 1 und Part 2). Die Anforderungen an Meßgeräte für die Schallintensität sind ebenfalls in einer Norm festgelegt (IEC 1043).

2.6.3 Schalleistung

Entsprechend den Definitionen (s. 2.1.1, Gl. (2.7) und Gl. (2.10)) kann man die Schalleistung im Freifeld bzw. im Halb-Freifeld oder im diffusen Schallfeld bestimmen. Eine von der Schallfeldart unabhängige Methode bietet das Vergleichsverfahren (s. 2.6.3.3). In Sonderfällen läßt sich die abgestrahlte Schalleistung aus der Schwingungsamplitude der Oberfläche der Schallquelle berechnen (VDI-Bericht 335, DIN 45635 Teil 8).

Die Bestimmung der Schalleistung mit Hilfe von Schallintensitätsmessungen ist auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen anwendbar (s. 2.6.2).

2.6.3.1 Schalleistung im freien Schallfeld

Die Definition Gl. (2.7) verlangt die Messung der Schallintensität auf einer die Schallquelle umhüllenden Fläche (Hüllfläche, Meßfläche), durch die der Schall hindurchtritt. Wenn die Schallquelle auf einer schallreflektierenden Fläche aufgestellt ist, kann sich der Schall nur oberhalb dieser Fläche ausbreiten (Halb-Freifeld, Freifeld über einer reflektierenden Ebene). Die Aufstellungsfläche gehört nicht zur Meßfläche.

Grundsätzlich kann die Hüllfläche eine beliebige Form haben. Für die praktische Anwendung sind jedoch die Kugel bzw. Halbkugelfläche und die Quaderfläche als besonders zweckmäßig eingeführt. Der Faktor $\cos\vartheta$ in der Definition Gl. (2.7) wird im allgemeinen gleich eins gesetzt. Der dadurch entstehende Fehler ist bei Kugel- und Halbkugelflächen mit einem Radius von mindestens dem Zweifachen der größten Abmessung der Schallquelle vernachlässigbar. Bei Anwendung der Quaderfläche auf ausgedehnte Schallquellen (z. B. größere Maschinen) mit ungleichmäßig verteilten Schallquellen kann der Meßfehler einige Dezibel erreichen. Bei großen Schallquellen wird aber auch die Anwendung der Halbkugel-Fläche wegen der erforderlichen Abstände

zunehmend schwieriger. Für diese Messungen ist die Messung der Schallintensität (s. 2.6.2) vorzuziehen.

Messungen im Freien setzen geeignetes Wetter (insbesondere Windgeschwindigkeiten möglichst niedrig), genügenden Abstand von reflektierenden Hindernissen (z. B. Gebäuden) und einen genügend niedrigen Störpegel der Umgebungsgeräusche voraus.

Die Messung der Schallintensität (s. 2.6.2) wird im allgemeinen durch die Messung des Schalldruckpegels angenähert. Zur Vereinfachung der Auswertung werden, von Sonderfällen abgesehen, die Meßpunkte so auf der Meßfläche verteilt, daß jedem Meßpunkt ein etwa gleichgroßes Flächenelement zugeordnet werden kann. Der Pegel des über alle Mikrofonorte auf der Meßfläche gemittelten Schalldrucks (Mittelungspegel, s. 2.6.1) wird als Meßflächen-Schalldruckpegel $\bar{L}_p$ bezeichnet. Der Schalleistungspegel (s. 2.1.1, Gl. (2.8)) ergibt sich aus $\bar{L}_p$ und der Größe der Meßfläche S sowie der Bezugsfläche $S_0 = 1\,\mathrm{m}^2$ nach der Beziehung:

$$L_W = \bar{L}_p + 10\lg(S/S_0)\,\mathrm{dB} \tag{2.26}$$

Falls erforderlich sind noch Korrekturen für Fremdgeräusche, Reflektionen aus der Umgebung und Änderungen von Luftdruck und Temperatur anzubringen (DIN 45635 Teil 1).

Für die meisten Anwendungen wird der Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung A gemessen; wenn Informationen über die Frequenzzusammensetzung verlangt werden, ist $\bar{L}_p$ in Terz- bzw. Oktavbereichen zu messen. Auf diese Weise ergeben sich die entsprechenden Schalleistungspegel L_{WA}, $L_{W\mathrm{Okt}}$, $L_{W\mathrm{Terz}}$.

Die Anordnung der Meßpunkte auf der Meßfläche hat die Aufgabe, einen möglichst guten Schätzwert für den Meßflächen-Schalldruckpegel zu liefern und wird zusätzlich von Fragen der einfachen Anwendung (s. Fig. 2.9) und der Fehlerquellen bestimmt. In den Normen und Vorschriften sind daher unterschiedliche Meßpunktanordnungen zu finden. Ein bewährtes Kriterium sagt, daß die Zahl der Meßpunkte mindestens so groß sein soll wie der zahlenmäßige Unterschied der an diesen Punkten gemessenen

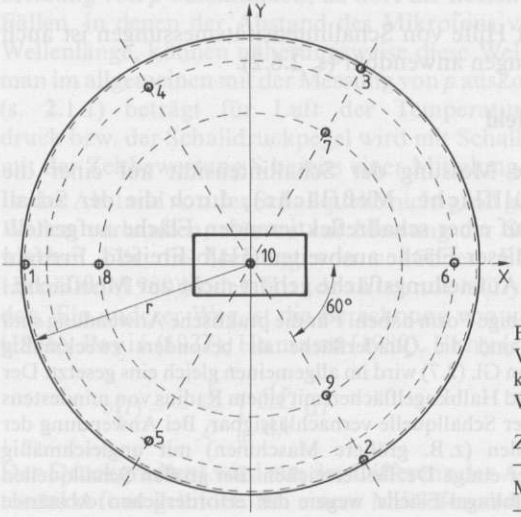

Fig. 2.9
Vereinfachte Mikrofonanordnung auf der Halbkugelmeßfläche. Die Z-Komponenten haben die Werte (nach DIN 45635 Teil 1)

Z	$0{,}15\,r$	$0{,}45\,r$	$0{,}74\,r$	r
Meßpunkt	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	10

größten und kleinsten Schalldruckpegel. Bei einer allseitig gleich abstrahlenden Quelle genügt im Prinzip ein einziger Meßpunkt.

Für die Halbkugelmeßfläche ist die in der folgenden Tab. 2.1 angegebene Anordnung von 10 Meßpunkten zu empfehlen, die auch bei Schallquellen, die vorwiegend Töne abstrahlen, Fehler durch Interferenzeffekte weitgehend vermeidet. Bei Halbkugel-Radien, die von 1 m abweichen, sind die in der Tabelle angegebenen Werte mit dem Radius (in Metern) zu multiplizieren.

Tab. 2.1 Koordinaten für 10 Meßpunkte auf einer Halbkugelmeßfläche mit 1 m Radius, nach DIN 45635 Teil 1 (Schallquellenmitte über dem Koordinatenursprung)

Meßpunkt Nr.	x in m	y in m	z in m
1	0,16	−0,96	0,22
2	0,78	−0,60	0,20
3	0,78	0,55	0,31
4	0,16	0,90	0,41
5	−0,83	0,32	0,45
6	−0,83	−0,40	0,38
7	−0,26	−0,65	0,71
8	0,74	−0,07	0,67
9	−0,26	0,50	0,83
10	0,10	−0,10	0,99

Wenn die Meßpunkte nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfaßt werden, muß eine genügende Konstanz der Schallquelle gewährleistet sein. Das gilt auch, wenn das Mikrofon auf der Meßfläche in bestimmten Bahnen herumgeführt wird, wobei die Verwendung von Schallpegelmessern mit Mittelungseinrichtungen die Mittelung erleichtert.

Als besonders vorteilhaft hat sich die Abtastung der Halbkugeloberfläche auf einer Spiralbahn erwiesen, wobei sich die Schallquelle dreht, während das Mikrofon auf einem Viertelkreis von der Aufstellungsfläche der Schallquelle in die senkrechte Position geschwenkt wird (ISO 3745, Annex F). Das gilt insbesondere für Präzisionsmessungen zur Kalibrierung von Vergleichsschallquellen (s. 2.6.3.3).

Eine annähernd gleich gute, in der Ausführung aber einfachere Meßpunktanordnung zeigt die Quadermeßfläche. Der Abstand der Meßfläche von der Maschinenoberfläche soll im allgemeinen 1 m, mindestens jedoch 0,25 m betragen. Bei nicht zu großen Schallquellen besteht die Grundanordnung aus 9 Meßpunkten, je einer in der Mitte der 5 Seiten und in den 4 oberen Ecken des Quaders.

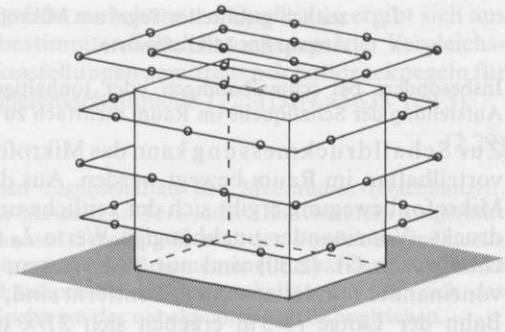

Fig. 2.10
Mikrofonanordnung auf der Quadermeßfläche bei einer großen Maschine. Die Verbindungslinien der Meßpunkte stellen Meßpfade dar. Der Abstand von dem „Bezugsquader", der den kleinsten die Maschine umschließenden Quader darstellt, soll $d = 1$ m betragen (nach DIN 45635 Teil 1)

Die Mikrofonanordnung und die Meßpfade an einer großen Maschine zeigt Fig. 2.10.

Die Meßunsicherheit für die A-bewerteten Schalleistungspegel kann als Standardabweichung unter Wiederholbedingungen mit etwa 1,5 dB angesetzt werden.

2.6.3.2 Schalleistung im diffusen Schallfeld

Aus den Definitionen (s. 2.1.1, Gl. (2.9) u. (2.10)) ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Schalleistung P, die von einer Schallquelle in einen Hallraum (s. 2.1.3) eingestrahlt wird, und dem mittleren Schalldruckquadrat in diesem Raum. Der Proportionalitätsfaktor stellt, abgesehen von dem Faktor $1/4\varrho c$, die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes dar.

In Pegelschreibweise ergibt sich der Ausdruck (DIN EN 23741):

$$L_W = L_{p\mathrm{m}} - 10\lg\frac{T}{T_0}\,\mathrm{dB} + 10\lg\frac{V}{V_0}\,\mathrm{dB} + 10\lg\left(1+\frac{S\lambda}{8V}\right)\mathrm{dB} - 10\lg\frac{B}{1000}\,\mathrm{dB} - 14\,\mathrm{dB} \tag{2.27}$$

L_W Schalleistungspegel,
$L_{p\mathrm{m}}$ Mittelungspegel des Schalldrucks im diffusen Schallfeld,
T Nachhallzeit in s; $T_0 = 1$ s,
V Hallraumvolumen in m³; $V_0 = 1\,\mathrm{m}^3$,
S Gesamtoberfläche des Raumes in m²,
λ Wellenlänge bei der Mittenfrequenz des entsprechenden Frequenzbandes in m.
B statischer Druck in mbar

Das vierte Glied auf der rechten Seite der Formel ist eine Korrektur für die Bereiche des Hallraumes in Wand- und Quellennähe, in denen der Schalldruck höher ist als im Bereich des diffusen Schallfeldes. Das fünfte Glied berücksichtigt Änderungen des Luftdruckes.

Die Meßunsicherheit wird überwiegend durch die Messung von $L_{p\mathrm{m}}$ bestimmt. Als Maß für die Steuerung der Schalldruckpegel an verschiedenen Stellen des diffusen Schallfeldes dient die Standardabweichung.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(L_i - L_\mathrm{m})^2} \tag{2.28}$$

L_i zeitlich gemittelter Pegel am Mikrofonort i,
n Anzahl der Mikrofonorte.

Insbesondere bei schmalbandigen oder tonhaltigen Geräuschen ist es notwendig, auch die Aufstellung der Schallquelle im Raum mehrfach zu ändern.

Zur Schalldruckmessung kann das Mikrofon an bestimmten Stellen aufgestellt oder, vorteilhafter, im Raum bewegt werden. Aus der Mittelung der Meßwerte während der Mikrofonbewegung ergibt sich der zeitliche und räumliche Mittelungspegel des Schalldrucks. Voneinander unabhängige Werte L_i für die Berechnung der Standardabweichung nach Gl. (2.30) sind nur zu erwarten, wenn die entsprechenden Mikrofonorte voneinander mindestens um $\lambda/2$ entfernt sind; bei Bewegungen des Mikrofons auf einer Bahn der Länge $l \geqslant 3$ m ergeben sich $2l/\lambda$ unabhängige Werte von L_i. Als weitere

Bedingung für die Mikrofonaufstellung ist der Abstand von mindestens $\lambda/2$ von den Wänden und ggf. Diffusoren und ein Abstand von $d_{\min} = 0{,}16\sqrt{V/T}$ (V Raumvolumen in m^3, T Nachhallzeit in s) von der Schallquelle einzuhalten. Dieser Mindestabstand ist gleich dem doppelten Hallradius r_H (s. 2.1.2) bei Aufstellung der Quelle auf dem Boden des Hallraumes.

Ein Raum ist nur dann zur Messung der Schalleistung geeignet, wenn die Standardabweichung der Schalldruckpegel bestimmte, frequenzabhängige Werte nicht überschreitet, wenn der Raum mit Rauschsignalen oder Tönen angeregt wird (DIN EN 23741, DIN EN 23742).

Da die Nachhallzeit frequenzabhängig ist, müssen die Messungen in Terz- oder Oktavbändern ausgeführt werden. L_{WA} muß aus diesen Werten unter Berücksichtigung der Frequenzbewertung A (s. 2.6.1) berechnet werden (DIN EN 23741 Anhang C).

In sehr guten Hallräumen läßt sich für zeitlich konstante Schallquellen bei der Messung von $L_{W\,\mathrm{Terz}}$ im Frequenzbereich 400 bis 5000 Hz (Terzband-Mittenfrequenzen) eine Standardabweichung von 1,5 dB unter Vergleichsbedingungen einhalten.

Bei geringeren Ansprüchen an die Meßunsicherheit kann man L_{WA} in besonders hergerichteten Hallräumen unmittelbar bestimmen. Dazu muß der Raum durch eine geeignet abgestimmte absorbierbare Auskleidung auf eine annähernd frequenzunabhängige Nachhallzeit gebracht werden (DIN 45635 Teil 3).

Die Definition (2.10) setzt einen Gleichgewichtszustand zwischen abgestrahlter und absorbierter Schallenergie voraus, daher ist dieses Verfahren nicht auf Einzelimpulse oder Impulsfolgen mit einem größeren Impulsabstand anzuwenden. Das Hallraumverfahren liefert auch keine Aussagen über die Richtcharakteristik der Schallquelle.

2.6.3.3 Vergleichsverfahren

Die Anwendung des Vergleichsverfahrens setzt voraus, daß eine sogen. Vergleichsschallquelle (reference sound source; François (1977), ISO 6926) vorhanden ist. Als Vergleichsschallquellen eignen sich vor allem abgeänderte Lüfter (aerodynamische Schallquelle), die ein rauschartiges breitbandiges Geräusch abstrahlen, dessen Schalleistungspegel zeitlich sehr konstant ist. Lautsprecher als Vergleichsschallquellen besitzen den Vorteil, daß man das Spektrum und den Pegel des Geräusches verändern kann, allerdings steht diesem Vorteil eine gegenüber der aerodynamischen Schallquelle vergrößerte Meßunsicherheit gegenüber.

Das Vergleichsverfahren ist von den Umgebungsbedingungen weitgehend unabhängig. Bei gleicher Mikrofonanordnung sind zwei Messungen des Schalldruckpegels in Frequenzbändern oder A-bewertet auszuführen, wobei nacheinander die Vergleichsschallquelle und die unbekannte Schallquelle an der gleichen Stelle des Meßraumes aufgestellt werden. Der Schalleistungspegel der unbekannten Quelle L_{Wx} ergibt sich aus dem durch eine Kalibrierung (ISO 6926) bestimmten Schalleistungspegel der Vergleichsschallquelle L_{Wr} und den über alle Mikrofonstellungen gemittelten Schalldruckpegeln für die unbekannte Quelle L_{pmx} und die Vergleichsschallquelle L_{pmr} (DIN 45635 Teil 3).

$$L_{Wx} = L_{Wr} + L_{pmx} - L_{pmr} \tag{2.29}$$

Wenn zu vermuten ist, daß die akustischen Eigenschaften des Meßraumes (Nachhallzeit, Reflexionen) frequenzabhängig sind, muß die Messung in Terz- oder Oktavbändern ausgeführt werden. Nur wenn die Spektren der unbekannten Schallquelle und der Vergleichsschallquelle innerhalb weniger dB übereinstimmen, kann in solchen Meßräumen unmittelbar der A-bewertete Schalleistungspegel bestimmt werden. Bei Lautsprecher-Vergleichsschallquellen läßt sich das Spektrum der Vergleichsschallquelle an das Spektrum der unbekannten Quelle angleichen.

In Freifeld- und Hallfeld-Räumen (DIN 45635 Teil 1) sowie in dem Sonder-Hallraum (DIN 45635 Teil 3) bestehen für die Bestimmung des A-bewerteten Schalleistungspegels keine Einschränkungen außer in der Größe der Schallquellen. Im Sonder-Hallraum soll das Volumen der Schallquelle 1% des Meßraumes nicht übersteigen, im Freifeld und Halbfreifeld soll die größte Abmessung der Schallquelle kleiner als 15 m sein. Wenn sich die unbekannte Schallquelle nicht in einen der genannten Meßräume bringen läßt, kann man mit einem abgewandelten Vergleichsverfahren den Schalleistungspegel der unbekannten Quelle zumindest näherungsweise bestimmten (ISO 3747).

2.6.4 Schallabstrahlung

2.6.4.1 Maschinen

Als Meßgröße dient der A-bewertete Schalleistungspegel (s. 2.6.3 u. Tab. T 2.09 in Band 3). Als ergänzende Meßgrößen sind vorgesehen (DIN 45635 Teil 1):

- Schalldruck-Mittelungspegel am Arbeitsplatz der Maschine (arbeitsplatzbezogener Emissionswert), bei starken Impulsen zusätzlich der
- Pegel des Spitzenwertes des unbewerteten Schalldrucks L_{peak} (DIN 45645 T 2)
- Impulshaltigkeit $K_I = (L_{pAIm} - L_{Aeq})$, ($L_{Aeq} = L_{pASm}$ (s. 2.6.1))
- Schallspektrum (Schalleistungsspektrum, Schalldruckspektrum)
- Richtungsmaß im Freifeld $DI = L_{pAmax} - \bar{L}_{pA}$ bzw. Richtungsmaß im Halb-Freifeld $DI = L_{pAmax} - \bar{L}_{pA} + 3\,\text{dB}$ (L_{pAmax} größter der an den Meßpunkten der Meßfläche gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegel, $\bar{L}_{pA}$ A-bewerteter Schalldruck-Mittelungspegel auf der Meßfläche).

Die Aufstellungs- und Betriebsbedingungen beeinflussen im allgemeinen erheblich die Schallabstrahlung der Maschine und können sich auch auf die Meßunsicherheit auswirken.

In Normen (DIN 45635 Teil 10 u. folgende) sind daher entsprechende maschinen-spezifische Festlegungen getroffen worden. Für Maschinen, die in diesen Normen nicht behandelt sind, ist als allgemeiner Grundsatz eine weitgehende Annäherung an die üblichen besonders häufigen oder typischen Ausstellungs- und Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der Reproduzierbarkeit und des Aufwandes anzustreben. Die gewählten Bedingungen sind im Meßbericht ausführlich zu beschreiben. Ebenso ist genau festzulegen und zu beschreiben, welche Teile, Zusatzgeräte, Leitungen u. ä. zur Maschine gerechnet werden und welche von den ggf. wählbaren Ausstattungen und Werkzeugen verwendet wurden.

2.6.4.2 Fahrzeuge

Als Meßgröße wird anstelle des A-bewerteten Schalleistungspegels der größte mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung F bei der Vorbeifahrt gemessene Schalldruckpegel verwendet. Die Beschaffenheit der Fahrbahn, der Abstand von der Fahrspur und der einzuhaltende Betriebszustand sind in Verordnungen und Normen festgelegt.

Bei Kraftfahrzeugen und Straßenbahnen beträgt der Mikrofonabstand von der Fahrspurmitte 7,5 m. Kraftfahrzeuge (DIN ISO 362, DIN ISO 5130) sind mit einer vom Fahrzeugtyp abhängigen Getriebeeinstellung unter Vollgas-Beschleunigung bei Geschwindigkeiten um 50 km/h zu betreiben, Straßenbahnen (DIN 45637) fahren konstant mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h. Bei Eisenbahnen und Binnenschiffen (DIN 45640) beträgt der bevorzugte Mikrofonabstand von der Gleismitte bzw. Bordwand 25 m. Stadt- und Untergrundbahnen sollen bei der Messung mit 60 km/h, Fernbahnen mit 80 (160, 200, 250, 300) km/h fahren, bei Wasserfahrzeugen sollen die

Antriebsmaschinen bei Nennleistung mit mindestens 95% der im Schiffsattest angegebenen Drehzahl laufen.

Bei Propellerflugzeugen bis 5700 kg Höchstgewicht ist der Maximalwert von L_{pAS} beim Überflug in einer Höhe von 305 m bei höchstzulässiger Dauerleistung zu messen (Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge (1991)).

2.6.5 Schalleinwirkung am Arbeitsplatz und im Wohnbereich

Als Meßgröße wird der Beurteilungspegel L_r verwendet (DIN 45645 Teil 1), der sich aus dem A-bewerteten Mittelungspegel L_{pAm} bzw. L_{Aeq} (s. 2.6.1) und Zuschlägen für die besondere Störwirkung von auffälligen Tönen (K_T) und Impulsen (K_I), zusammensetzt:

$$L_r = L_{Aeq} + K_I + K_T \tag{2.30}$$

Bei der Beurteilung von Gehörschäden wird $K_T = 0$ eingesetzt, die Anwendung von K_I ist in diesem Fall umstritten.

An Arbeitsplätzen (DIN 45645 Teil 2) erstreckt sich die Mittelung über eine Arbeitsschicht, im Wohnbereich (VDI 2058 Blatt 1) wird der Tag vorzugsweise in drei Abschnitte (Tag von 07 bis 19 Uhr), Ruhezeiten 19 bis 22 Uhr und 06 bis 07 Uhr, Nacht 22 bis 06 Uhr) eingeteilt.

Am Arbeitsplatz wird das Mikrofon in Ohrnähe des an dem betreffenden Platz beschäftigten Arbeiters aufgestellt (DIN 45645 Teil 2, VDI 2058 Blatt 2).

Im Wohnbereich soll bei Geräuscheinwirkung von außerhalb des Gebäudes (z. B. Verkehrsgeräusche, Industriegeräusche) das Mikrofon 0,5 m außen vor der Mitte des geöffneten, am stärksten betroffenen Fensters, oder 3 bis 4 m vor dem Gebäude aufgestellt werden.

Die Messung braucht im allgemeinen nicht über die ganze Beurteilungszeit (Schicht, Tag, Ruhezeit, Nacht) bzw. über das ganze langfristige Kennzeichnungszeitintervall ausgedehnt zu werden, es genügt meist, durch geeignete Stichproben, die auch langfristige Schwankungen einschließen sollen, einen entsprechenden Schätzwert zu bestimmen.

Die gemessenen Werte des Beurteilungspegels können mit Richtwerten verglichen werden, um zu beurteilen, ob die Schalleinwirkung mit einer gegebenen Wohnsituation (VDI 2058 Blatt 1) oder mit einer bestimmten Tätigkeit (VDI 2058 Blatt 3) vereinbar ist (s. Tab. T 2.09 u. T 2.10 in Band 3).

Literatur zu 2.6

Baker, S. (1955): An acoustic intensity meter. J. Acoust. Soc. Am. **27**, 269–273

Chung, J. Y. (1978): Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch. J. Acoust. Soc. Am. **64**, 1613–1616

DIN 45635 Teil 1 (April 1984): Geräuschmessung an Maschinen, Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen

DIN EN 23741 (Nov. 91): Akustik; Ermittlung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen; Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 für breitbandige Quellen (ISO 3741: 1988); Deutsche Fassung EN 23741: 1991

DIN EN 23742 (Nov. 91): Akustik; Ermittlung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen. Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 für tonale und schmalbandige Quellen (ISO 3742: 1988); Deutsche Fassung EN 23742: 1991

DIN 45635 Teil 3 (Nov. 1985): Geräuschmessung an Maschinen, Luftschallmessung, Sonder-Hallraum-Verfahren, Rahmen-Meßverfahren (Genauigkeitsklasse 2)

DIN 45635 Teil 8 (Juni 1985): Geräuschmessung an Maschinen, Körperschallmessung, Rahmen-Meßverfahren

DIN 45635 Teil 10 (Mai 1974): Geräuschmessung an Maschinen, Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Rotierende elektrische Maschinen. DIN 45635 Teil 11 und folgende enhalten Angaben für andere Maschinenarten

DIN 45637, Entwurf (Nov. 1990): Außengeräuschmessungen an spurgebundenen Fahrzeugen

DIN 45640 (Juni 1990): Außengeräuschmessungen an Wasserfahrzeugen auf Binnengewässern