



# Der Schallpegelmessgerät - ein unentbehrliches Meßgerät für den Umweltschutz Teil 2

Dr. Ivar Veit

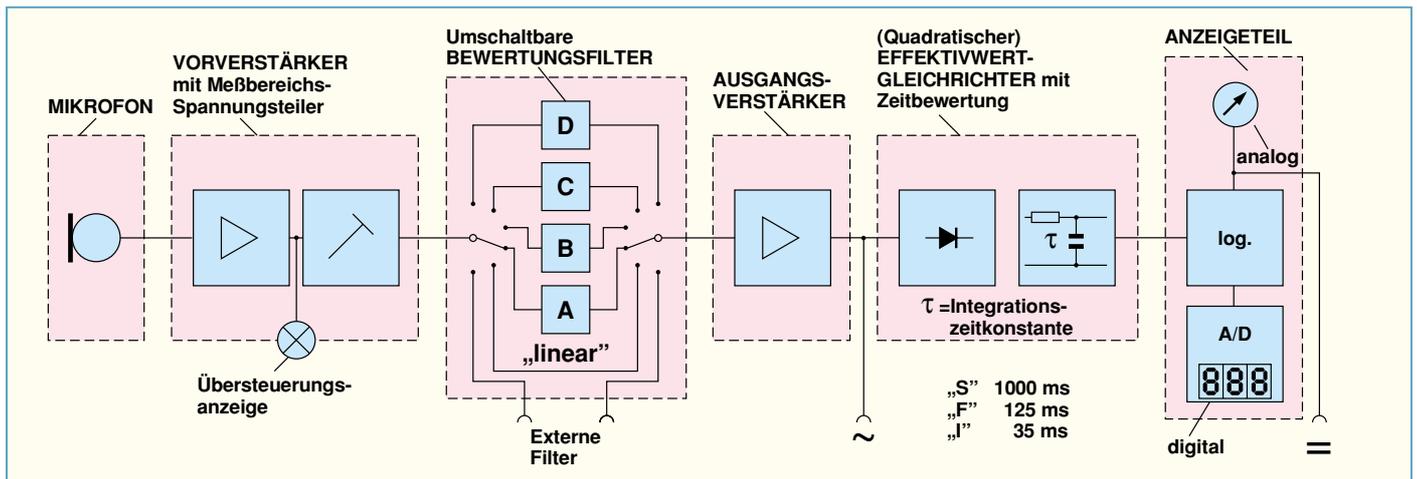
**Die Funktionen und die akustischen Eigenschaften von Schallpegelmessern werden im 2. Teil dieses Artikels erläutert. Dazu gehören der Freifeld- und der Diffusfeld-Frequenzgang sowie Fragen der Kalibrierung.**

## Der Schallpegelmessgerät - akustischer Teil

Zur Messung von Schalldruckpegeln gibt es Schallpegelmessgerät, die von verschiedenen Herstellern auf dem Markt angeboten werden. Damit das gemessene „Dezibel“ des einen Geräteherstellers auch gleich dem des anderen ist, und zwar gemessen an je-

dem Ort und zu jeder Zeit, gibt es nationale und internationale Normen, in denen die an Schallpegelmessgerät zu stellenden Anforderungen klar und eindeutig niedergelegt sind. In Deutschland sind dies heute die DIN/IEC-Normen 651 für Schallpegelmessgerät und 804 für Integrierende Schallpegelmessgerät. Die deutschen Vorgänger dieser Normen sind die DIN 45633, Blatt 1/2 und die DIN 45634; beide sind derzeit noch gültig.

In allen Ländern besteht generell die Pflicht, daß die zur amtlich anerkannten Schallpegelmessung eingesetzten Meßgeräte den entsprechenden Normen genügen müssen. Dies wird in Form einer Typenprüfung von den zuständigen Ämtern bzw. Anstalten ausgeführt. Ferner müssen alle diese Geräte jeweils nach einer bestimmten Zeitspanne amtlich überprüft werden. Doch nun zur Technik: Jeder Schallpegel-



**Bild 6: Blockschaltbild eines Schallpegelmessers**

gelmesser besteht grundsätzlich aus:

- einem Mikrofon,
- einem Vorverstärker, in dem Spannungsteiler enthalten sein können, mit deren Hilfe das zu messende Geräusch an den Darstellungsbereich des Anzeigeteils angepaßt werden kann,
- einem Block mit umschaltbaren Bewertungsfiltren (A, B, C, D; in der Betriebsart „linear“ werden bei unbewerteten Schallpegelmessungen alle Frequenzen innerhalb des Hörschallbereichs gleichmäßig verstärkt),
- einem weiteren Verstärker sowie
- einem darauffolgenden Effektivwert-Gleichrichter (Detektor)
- und dem Anzeigeteil,

siehe dazu auch das Blockschaltbild in Bild 6.

Die Meßmikrofone unserer heutigen Schallpegelmesser sind ausnahmslos Kondensatormikrofone. Über den Aufbau und die Funktion von Kondensatormikrofonen hat der Autor bereits im „ELVjournal“ Nr. 44, März/April 1986, Seite 20-21 berichtet. Seit einigen Jahren sind auch Elektret (Kondensator)-mikrofone im Einsatz, die sich bei Präzisions-Schallpegelmessern bewährt haben. Von der akustischen Funktion her sind die bei Schallpegelmessern verwendeten Meßmikrofone außerdem Druckempfänger, d. h. ihre Membranauslenkung ist dem jeweils herrschenden Schalldruck direkt proportional. Infolgedessen sind die elektroakustischen Empfangs- und Übertragungseigenschaften (= Empfindlichkeit) solcher Mikrofone, ausgedrückt durch deren elektroakustischen Übertragungsfaktor

$$B_E = \frac{u}{p} \quad (\text{V/Pa})$$

u = elektrische Spannung an den Anschlußklemmen des Mikrofons

p = vom Mikrophon empfangener Schalldruck

bzw. deren elektroakustisches Übertragungsmaß

$$G_E = 20 \cdot \lg \frac{B_E}{B_{E0}} \quad (\text{dB über } 1 \text{ V/Pa})$$

$$B_{E0} = \text{Bezugs-Übertragungsfaktor} = 1 \text{ V/Pa}$$

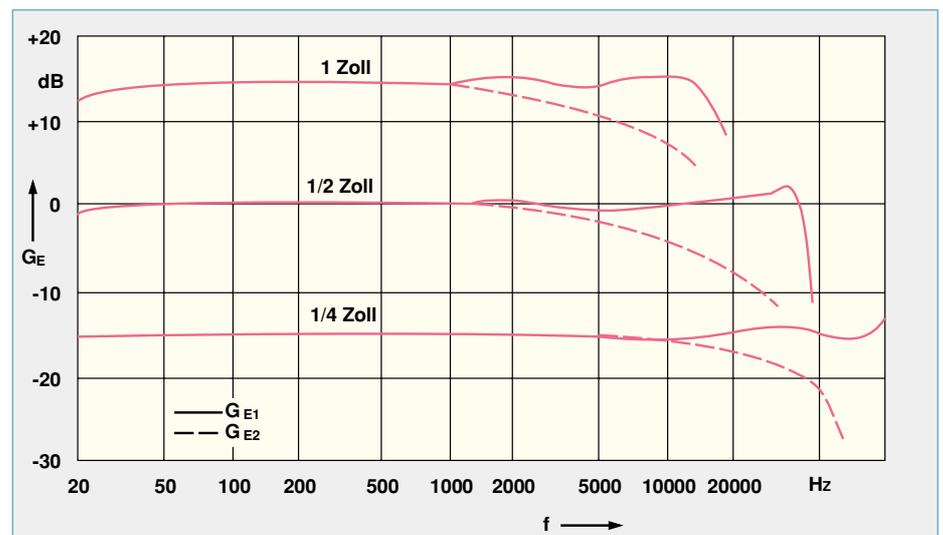
unabhängig von der Schalleinfallrichtung. Mit Schallpegelmessern mißt man somit richtungsunabhängig. Diese Tatsache ist bei druckempfindlichen Mikrofonen vom Prinzip her gegeben, allerdings nur unter der Voraussetzung, daß deren geometrische Abmessungen klein im Vergleich zur Schallwellenlänge  $\lambda$  ( $= c/f$  = Schallausbreitungsgeschwindigkeit dividiert durch die Schallfrequenz f) sind.

Was geschieht nun aber, wenn diese Voraussetzung nicht mehr erfüllt ist? Und irgendwann ist das bei ansteigender Frequenz einmal der Fall. Nähert sich nämlich mit wachsender Frequenz die Schallwellenlänge größenordnungsmäßig dem

Durchmesser des Meßmikrofons, so kommt es zu einer Rückwirkung des Mikrofons auf das Schallfeld.

Als Ergebnis dieser „Störung“ des Schallfeldes entsteht vor dem Mikrophon ein lokal begrenzter (Schall-) Druckstau, der - insbesondere bei senkrecht auf die Mikrophonmembran einfallenden, ebenen Schallwellen - einen entsprechenden Anstieg der vom Mikrophon abgegebenen Signalspannung im höheren Frequenzbereich zur Folge hat. Es wird somit ein höherer Schalldruck bzw. Schalldruckpegel gemessen und angezeigt, als er ohne Vorhandensein des Mikrofons am gleichen Ort herrschen würde. Dieser bei senkrechtem Schalleinfall angezeigte erhöhte Schalldruck ist stets größer als bei statistisch aus allen Richtungen gleichmäßig verteiltem Schalleinfall (= Diffusfeld).

Je größer der Mikrophondurchmesser ist, um so früher tritt diese druckstaubedingte Überhöhung auf. Bei Mikrofonen mit eiMi-



**Bild 5: Elektroakustische Übertragungsmaße von drei Kondensator-Meßmikrofonen unterschiedlichen Kapseldurchmessers (Relativdarstellung, bezogen auf die 1/2-Zoll-Kapsel).**

$G_{E1}$  = Freifeld-Frequenzgang für senkrechten Schalleinfall  
 $G_{E2}$  = Diffusfeld-Frequenzgang

nem Durchmesser von beispielsweise 1 Zoll (= 25,4 mm) tritt dieser Effekt bereits ab etwa 1 kHz auf, bei Mikrofonen mit kleinerem Durchmesser geschieht das erst bei höheren Frequenzen, siehe dazu Bild 7. Bei der Auswahl und Anwendung von Mikrofonkapseln für Meßzwecke sollte man an diesen physikalisch bedingten Effekt denken.

Bei senkrechtem Schalleinfall ist die druckstaubedingte Überhöhung am größten. Aber auch bei schrägem Schalleinfall ist eine - je nach Einfallswinkel - mehr oder weniger erkennbare Überhöhung im Bereich der höheren Frequenzen vorhanden. Das bedeutet, daß Meßmikrofone (entgegen der sonst geltenden Vorstellung) bei höheren Frequenzen den Schall sehr wohl „richtungsabhängig“ empfangen. Für Meßzwecke hat das natürlich Konsequenzen, vor allem bei Präzisionsschallpegelmessern. Um richtig zu messen, muß man das Ausmaß dieser „Richtungsabhängigkeit“ natürlich kennen. Die Hersteller von Meßmikrofonen geben aus diesem Grunde für ihre Erzeugnisse sogenannte 'Freifeld-Korrekturkurven' mit, aus denen die Pegelüberhöhungen in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel und von der Frequenz abgelesen werden können.

Wie solchen Freifeld-Korrekturkurven zu entnehmen ist, können druckstaubedingte Überhöhungen des elektroakustischen Übertragungsmaßes Werte bis über 12 dB erreichen. Hochwertige Meßmikrofone sind daher meist schon herstellereisei-

tig „freifeld-entzerrt“. Durch bestimmte Dämpfungsmaßnahmen im Kapselinneren gibt man solchen Mikrofonen für senkrechten Schalleinfall ( $0^\circ$ ) im freien Schallfeld einen weitestgehend geradlinigen Frequenzgang bis zur oberen Grenze des Meßfrequenzbereichs hinauf. Derartige Mikrofone bezeichnet man auch als Freifeld-Mikrofone.

Daneben gibt es in der akustischen Meßtechnik auch noch sogenannte Druckkammer-Mikrofone. Ihr Frequenzgang ist nur bei Messungen in Druckkammern geradlinig und überhöhungsfrei; dort, d. h. in Druckkammern, kann sich kein Druckstau aufbauen. Druckkammer-Mikrofone verwendet man beispielsweise für Messungen in Ohrkuppeln. Für Freifeldmessungen sind sie nicht geeignet. Umgekehrt sollte man Freifeld-Mikrofone nicht für Druckkammermessungen verwenden, da dort ihr Meßfrequenzbereich nach hohen Frequenzen hin sehr bald zu Ende wäre. Das Bild 8 zeigt diesen Zusammenhang noch einmal grafisch sehr deutlich.

Die im Bild 7 abgebildeten Frequenzgänge  $G_{E1}$  sind im übrigen auch schon Freifeld-Mikrofonkurven, d. h. „geglättete“ Frequenzgänge. Die dort mit  $G_{E2}$  bezeichneten, unterbrochenen Kurven gelten für Messungen im Diffusfeld. Ähnlich wie beim nicht vorgesehenen Druckkammereinsatz von Freifeld-Mikrofonen fallen deren Frequenzgänge auch bei diffusum Schalleinfall nach hohen Frequenzen hin sehr bald ab.

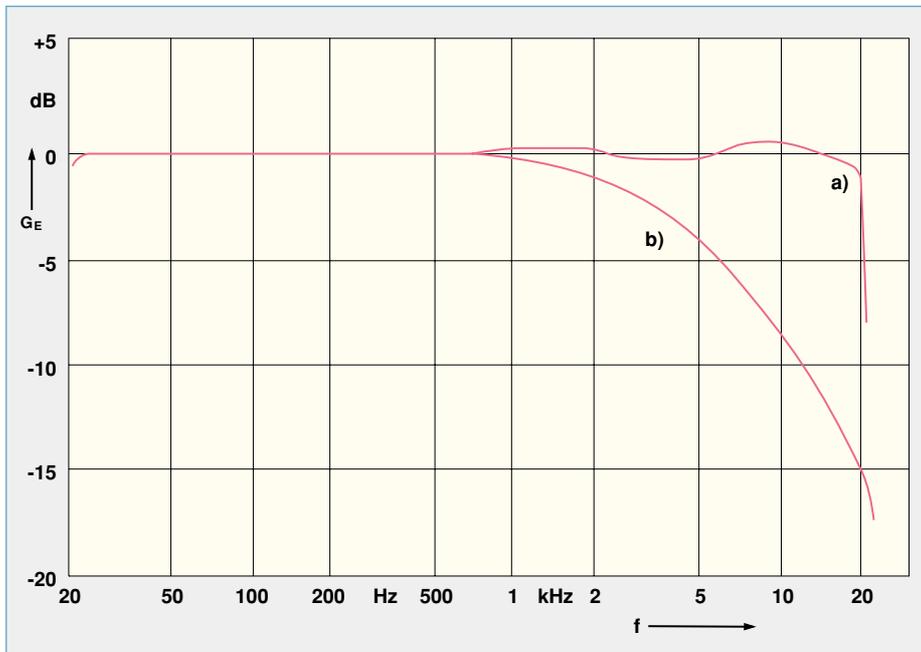
An die Freifeld-Übertragungseigenschaften höherwertiger Meßmikrofone werden nach den heutzutage gültigen Normen sehr hohe Anforderungen gestellt. In der DIN IEC 651 z. B. ist u. a. festgeschrieben, wie groß die maximal zulässigen Änderungen der angezeigten Schallpegel für Schalleinfallswinkel innerhalb der Grenzen  $\pm 30^\circ$  und  $\pm 90^\circ$  gegenüber einer vom Hersteller genannten Bezugsrichtung sein dürfen. Diese Angaben sind dort auch noch untergliedert in 5 verschiedene Frequenzbereiche, und zwar für alle 4 bei Schallpegelmessern üblichen Genauigkeitsklassen.

Bei all diesen Betrachtungen über die störende Rückwirkung des Meßmikrofons auf das Schallfeld hatten wir zunächst nur die Mikrofonkapsel und deren Abmessungen betrachtet. Nun ist aber bei den weitaus meisten Schallpegelmessern das Mikrofon fest mit dem eigentlichen Meßgerät verbunden, so daß auch das vergleichsweise große Gehäuse des Gerätes ebenfalls in das zu messende Schallfeld eingebracht wird, wo es - zumindest grundsätzlich - als feldstörender Einflußfaktor nicht von vornherein zu vernachlässigen ist.

Bereits in den 60er Jahren wurden bei einem namhaften Hersteller für akustische Meßgeräte, der Firma Brüel & Kjaer in Dänemark, diesbezügliche, grundlegende Untersuchungen durchgeführt, und zwar mit dem Ergebnis, daß Gehäuse, die konisch zum Mikrofon hin auslaufen, die geringsten Feldveränderungen um das Mikrofon herum verursachen. In der gleichen Untersuchung wurde damals bereits festgestellt, daß die bei einer Messung hinter dem Pegelmesser befindliche Bedienungsperson das Schallfeld u. U. wesentlich mehr stören kann (vor allem im Bereich 300 ...700 Hz) als das Gehäuse. Die detaillierten Untersuchungsergebnisse sind nachzulesen im Technical Review, Brüel & Kjaer, 1969, Nr. 2, S. 15 bis 20.

Mikrofone mit größerem Durchmesser haben ein größeres elektroakustisches Übertragungsmaß (= größere Empfindlichkeit) als Mikrofone mit kleinerem Durchmesser; dafür reicht aber ihr Übertragungsbzw. Meßfrequenzbereich nach höheren Frequenzen hin nicht so hoch hinauf, s. Bild 7. In der Praxis sind i. a. Meßmikrofondurchmesser von 1 Zoll, 1/2 Zoll, 1/4 Zoll und vereinzelt auch 1/8 Zoll üblich, wobei jede Halbierung des Mikrofonkapseldurchmessers eine Empfindlichkeitsabnahme um 14 dB (zumindest im Prinzip) bedeutet.

Neben der reinen Mikrofonempfindlichkeit ( $G_E$ ), dem Meß-Frequenzbereich und der Richtungsabhängigkeit (bei höheren Frequenzen) ist noch eine weitere Kenngröße zur Beurteilung eines Meßmikrofons von Bedeutung, nämlich sein Schalldruck (pegel)-Meßbereich (=Dynamikbereich).



**Bild 8 : a) Frequenzgang eines 1-Zoll-Freifeld-Mikrofons. Durch konstruktive Maßnahmen im Inneren der Mikrofonkapsel hat man einen Kurvenverlauf erreicht, der bei senkrechtem Schalleinfall ( $0^\circ$ ) im freien Schallfeld bis zur oberen Meßfrequenzgrenze hin nahezu geradlinig, und somit fast ideal verläuft.**

**b) Frequenzgang des gleichen Mikrofons, gemessen in einer Druckkammer (= Druckkammer-Frequenzgang).**

krofone mit großem Membrandurchmesser haben eine größere Meßempfindlichkeit als solche mit kleinerem Durchmesser, und man kann mit Ihnen auch die niedrigsten Schalldruckpegel messen. Bei sehr hohen Schalldruckpegeln treten zwei Begrenzungsmechanismen in Aktion: Zum einen wird die elektrische Ausgangsspannung größer, als die meisten nachfolgenden Vorverstärker verkraften können, und zum anderen kann die Spannung im Mikrofon selbst zusätzlich noch Verzerrungen erleiden.

Mikrofone mit kleinen Membrandurchmessern erlauben dagegen zwar die Messung sehr hoher Schalldruckpegel, dafür sind aber sehr niedrige Schalldruckpegel mit ihnen nicht erfaßbar. Außerdem entstehen an kleineren Mikrofonen wegen ihrer geringeren elektrischen Kapazität höhere elektrische Störpegel. Mit anderen Worten: Je nach Membrandurchmesser ergeben sich unterschiedliche Dynamikbereiche.

Hersteller von Kondensator-Meßmikrofonen geben den Arbeits- oder Dynamikbereich ihrer Erzeugnisse in den technischen Datenblättern stets an. Mikrofone mit einem Dynamikbereich von beispiels-

Anzeige des Schallpegelmessers innerhalb der nachfolgend angegebenen Fehlergrenzen richtig sein:

Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
± 0,4 dB	± 0,7 dB	± 1,0 dB	± 1,5 dB

Des weiteren müssen Einrichtungen verfügbar sein und auch verwendet werden, mit deren Hilfe die Kalibrierung des Schallpegelmessers überprüft und erforderlichenfalls korrigiert werden kann. Das bekannteste Hilfsmittel für eine praxisgerechte Überprüfung der Kalibrierung ist das Pistonphon, siehe Bild 8. Seine Funktion wird noch erläutert.

Zuvor nun noch eine weitere Forderung der DIN IEC 651, deren Einhaltung von guten Schallpegelmessern gewährleistet sein muß, nämlich die zeitliche Konstanz der Anzeige. Die maximal zulässige Änderung der Anzeige eines Schallpegelmessers darf sich danach innerhalb einer Betriebsstunde um nicht mehr als

Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
0,2 dB	0,3 dB	0,5 dB	0,5 dB

ändern. An der Einhaltung dieser Anforder-

0,7 dB bzw. G 1,0 dB. Solange diese Norm jedoch noch nicht in Kraft ist, gilt weiterhin die bisherige Festlegung mit insgesamt vier Genauigkeitsklassen.

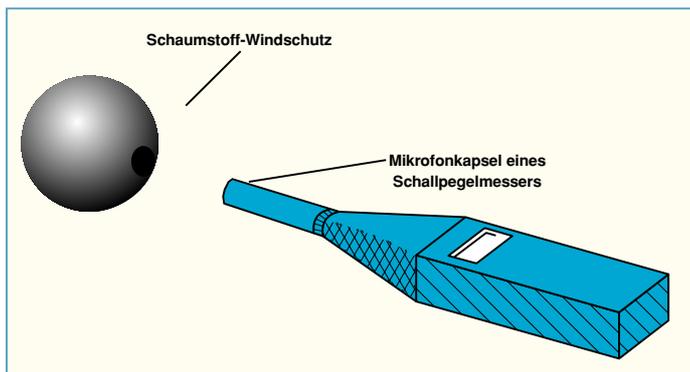
Für die Kalibrierung von Meßmikrofonen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine in der Praxis sehr häufig benutzte Methode beruht auf der Zuhilfenahme eines sogenannten Pistonfons (piston = Kolben). Das Pistonfon besteht aus einer allseits geschlossenen, meist zylindrischen Kammer, deren innere Abmessungen klein gegenüber der benutzten Wellenlänge sind; man nennt eine solche Kammer auch Druckkammer. Mit Hilfe eines motorisch oder elektrodynamisch angetriebenen Kolbens wird darin ein Schalldruck  $p$  erzeugt, der durch den größten Kolbenausschlag  $\hat{x}$  (von Spitze zu Spitze gemessen) genau definiert und innerhalb der gesamten Druckkammer konstant ist, siehe Bild 10. Die Druckkammer wird mit dem zu kalibrierenden Mikrofon schalldicht abgeschlossen, wobei eine in der Kammerwand befindliche Kapillare für den erforderlichen statischen Druckausgleich sorgt. Der durch die Kolbenbewegung innerhalb der Druckkammer und somit auch an der Mikrofonmembran erzeugte Effektivwert des Schalldrucks  $\tilde{p}$

$$\tilde{p} \sim \frac{p_{-} \hat{x} E S}{V_0}$$

ist direkt proportional dem atmosphärischen Luftdruck  $p_{-}$ , dem größten Kolbenausschlag  $\hat{x}$  und der Kolbenfläche  $S$ , sowie umgekehrt proportional dem mittleren Kolbenvolumen  $V_0$ . Bei den älteren Pistonfontausführungen konnte man den Kolbenausschlag  $\hat{x}$  an einer eigens dafür vorgesehenen Vorrichtung ablesen. Moderne Pistonfone sind so beschaffen, daß der im Inneren der durch das zu kalibrierende Meßmikrofon abgeschlossenen Druckkammer erzeugte Schalldruck  $\tilde{p}$  einen vom Hersteller angebenen und garantierten Wert hat, der lediglich noch vom atmosphärischen Luftdruck  $p_{-}$  abhängt. Solchen Pistonfönen liegt daher üblicherweise ein Luftdruckmesser (Barometer) bei.

Soweit zum akustischen Teil eines Schallpegelmessers.

Im dritten und letzten Teil dieser Beitragsserie wird der elektrische Teil von Schallpegelmessern angesprochen. **ELV**



**Bild 9 : Ein Schaumstoff-Windschutz bietet nicht nur Schutz vor Windgeräuschen, sondern er schützt die Mikrofonkapsel auch vor mechanischer Beschädigung.**

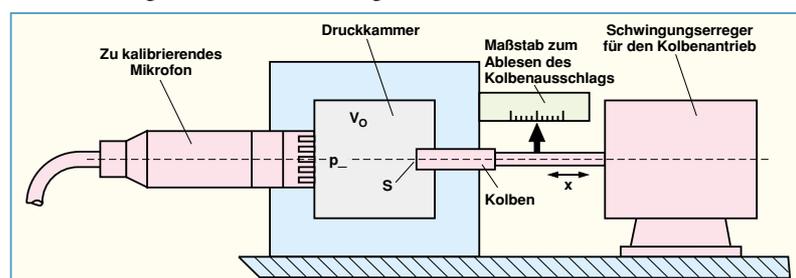
weise -10 dB bis 150 dB gehören schon zur 'gehobenen' Kategorie.

Wegen des sehr geringen Abstandes zwischen Membran und Gegenelektrode (z. B.: ca 10 µm) sind Kondensator-Mikrofone verständlicherweise sehr empfindlich gegen mechanische Stöße, z. B. beim Herunterfallen auf einen harten Boden. Nun gibt es zum Schutz vor Windgeräuschen eigens dafür geschaffene Schaumstoff-Windschützer (s. Bild 9), die auch einen wirksamen Mikrofonschutz gegen derartige mechanische Beschädigungen bieten.

Gemäß dem schon zuvor erwähnten Regelwerk DIN IEC 651 „Schallpegelmessers“, Dez. 1981, werden Schallpegelmessers in vier verschiedene Genauigkeitsklassen (0, 1, 2 und 3) eingeteilt, die sich insbesondere durch ihre Fehlergrenzen voneinander unterscheiden. Nach einer vom jeweiligen Hersteller anzugebenden Anlaufzeit des Gerätes, die in jedem Falle kürzer als 10 Minuten sein soll, muß die G

rungen hat auch das Meßmikrofon einen entscheidenden Anteil. Es bedarf daher keiner besonderen Erklärung, daß solche Mikrofone auch einen angemessenen Preis rechtfertigen. Kapseln sehr hochwertiger, eichfähiger Präzisionsschallpegelmessers können heute bis zu 1500,- DM und mehr kosten.

Gemäß der in Vorbereitung befindlichen und noch nicht in Kraft getretenen Schallpegelmessers-Norm IEC 1672 soll es in Zukunft nur noch zwei Genauigkeitsklassen 1 und 2 geben mit den Fehlergrenzen



**Bild 10 : Mikrofonkalibrierung mit einem Pistonfon**