

Richtig kalibrieren - richtig messen

Eine Anleitung zur Einstellung von Meßeinrichtungen der Schall- und Schwingungsmeßtechnik

1. Einleitung

Akustische Messungen werden heute auf der ganzen Welt in immer größerer Zahl durchgeführt. Von ihrem Ergebnis hängen oft technische, finanzielle oder juristische Entscheidungen von großer Tragweite ab. Damit rückt die Frage nach der Meßgenauigkeit und der Vertrauenswürdigkeit der Meßergebnisse stärker als bisher in den Mittelpunkt.

Um kleine Meßfehler und eine hohe Zuverlässigkeit zu erreichen, muß die Meßeinrichtung in bestimmter Weise eingestellt und kalibriert werden. Die hierzu erforderlichen Handgriffe sind zwar in den Bedienungsanleitungen der Geräte und Funktionsblöcke ausführlich dargestellt, jedoch behandeln diese Schriften das Kalibrierproblem vorrangig aus der Sicht des Gerätes, zu dem sie gehören, ohne auf die allgemeinen Zusammenhänge einzugehen.

Die vorliegende Applikationsschrift will diese Lücke schließen, indem sie in einer anwenderorientierten Darstellung die Grundlagen der Kalibrierung von Schall- und Schwingungsmeßgeräten erläutert. Das Verständnis für wesentliche Zusammenhänge versetzt den Messenden in die Lage, auch bei komplizierten Meßketten die Übersicht über Funktionsabläufe und Zustände zu behalten. Das erleichtert nicht nur die Bedienung, sondern schärft den Blick für mögliche Fehlfunktionen und ermöglicht darüber hinaus im Bedarfsfall die eigenständige Anpassung an Sonderbedingungen, zum Beispiel die Einbeziehung von Geräten fremder Hersteller.

Die folgenden Betrachtungen setzen voraus, daß der nach bestimmten Gesichtspunkten ausgewählte Meßplatz fertig aufgebaut vorliegt. Auswahl und Aufbau der Meßplätze sind bereits in Systemübersichten, Meßplatzbeschreibungen und Applikationsschriften ausführlich dargestellt [1], [2], [3] und werden hier nur dann gestreift, wenn es zur Beschreibung eines Sachverhaltes wichtig ist.

2. Ziel der Kalibrierung

Elektronische Meßeinrichtungen, darunter auch die Schall- und Schwingungsmeßgeräte, sind komplizierte Gebilde, die sich aus einer Vielzahl von funktionswichtigen Bestandteilen zusammensetzen. Selbst bei aller Sorgfalt des Herstellers und dem Bemühen um höchste Zuverlässigkeit und Stabilität der Eigenschaften läßt es sich nicht vermeiden, daß funktionswichtige Eigenschaften im Rahmen zulässiger Toleranzen schwanken und sich durch Temperatureinflüsse, zeitliche Drift oder andere Faktoren zeitweilig oder dauerhaft verändern.

Theoretisch ist es möglich, Zuverlässigkeit und Stabilität der Eigenschaften eines elektronischen Meßgerätes sehr hoch zu treiben. Der hierzu erforderliche gerätetechnische Aufwand steigt allerdings beim Überschreiten gewisser Grenzen in einem solchen Maße an, daß man diese Möglichkeit nur dort ausschöpft, wo Menschenleben und erhebliche Sachwerte direkt von der ständigen Funktionsfähigkeit der Geräte abhängen.

Bei Schall- und Schwingungsmeßgeräten liegt das technisch-ökonomische Optimum an anderer Stelle. Natürlich müssen auch diese Geräte bestimmte technisch begründete Mindestforderungen an die Zuverlässigkeit und die Konstanz der Eigenschaften erfüllen, jedoch ist es zumutbar, daß der Anwender die Meßkette in Abständen quantitativ überprüft, um sich von der Betriebsbereitschaft zu überzeugen oder sie wiederherzustellen. Dieser Vorgang wird als „Kalibrierung“ bezeichnet.

Im einzelnen dient die Kalibrierung folgenden Zwecken:

- Herstellung der Übereinstimmung zwischen dem Anzeigewert und dem wahren Wert hinsichtlich
 - Zahlenwert (im Rahmen zulässiger Abweichungen)
 - Größenordnung
 - Einheit
 (Kalibrierung im engeren Sinne)
- Funktionsprüfung der Meßkette zum Erkennen offensichtlicher Funktionsfehler

Soweit nicht anders angegeben, bezieht sich die Kalibrierung immer auf die vollständige Meßkette, beginnend mit dem Meßgrößenaufnehmer (Mikrofon, Schwingungsaufnehmer) und endend mit der Ausgabe der Meßwerte (Zeigerauslenkung, Digitalanzeige, ausgedrucktes Ergebnis, Schreibstiftauslenkung beim Pegelschreiber usw.).

Grundsätzlich ist es auch möglich, die Bestandteile der Meßkette einzeln für sich zu kalibrieren und anschließend zusam-

menzuschalten. Neben dem erhöhten Aufwand spricht besonders die Vergrößerung der Kalibrierunsicherheit durch Addition der Einzelfehler gegen diese Verfahrensweise.

Außerdem werden unter Umständen diejenigen Einflüsse nicht erfaßt, die sich erst aus dem Zusammenschalten der Funktionseinheiten ergeben. Deshalb sollte die Methode der getrennten Kalibrierung auf begründete Einzelfälle beschränkt bleiben.

Läßt sich eine Meßkette trotz Einhaltung aller Bedienungshinweise nicht ordnungsgemäß kalibrieren, dann liegt offenbar ein Fehler in der Zusammenschaltung oder ein Geräte- oder Kabeldefekt vor. Aber auch dann, wenn sich die Kalibrierung ohne Schwierigkeiten ausführen läßt, können Funktionsstörungen noch nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden. Natürlich ist eine ständige Kontrolle sämtlicher Geräteeigenschaften nicht möglich, jedoch kann man mit Aufmerksamkeit und Überlegung die meisten Defekte rechtzeitig erkennen und Fehlmessungen vermeiden. Auch hierzu enthält die vorliegende Schrift helfende Hinweise.

1. Allgemeine physikalische Zusammenhänge 1.1. Zusammenhänge der Schall- und Schwingungsmeßgrößen

Wie im Abschnitt 3.2. noch näher erläutert, steht am Anfang der Meßkette in der Regel ein Aufnehmer, der einen physikalischen Vorgang in ein analoges Wechselspannungssignal umsetzt. Je nach Wandlerart sind folgende Größen direkt meßbar:

- Schalldruck p (Schwankungskomponente des umgebenden atmosphärischen Luftdrucks um den konstanten oder sehr langsam veränderlichen Ruhewert)
- Schwingbeschleunigung a
- Schwinggeschwindigkeit v
- Schwingweg ξ (dynamische Lageveränderung um eine Ruhelage)

Während der Schalldruck einen akustischen Vorgang kennzeichnet, beschreiben die anderen drei Größen eine mechanische Erscheinung (Vibration). Die Schwingungskenngrößen a , v und ξ sind über die Beziehungen

$$v = \frac{d\xi}{dt} \quad (1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2\xi}{dt^2} \quad (2)$$

miteinander verknüpft und können deshalb ineinander überführt werden.

Definitionsgemäß sind der Schalldruck und die Schwingungskenngrößen reine Wechselgrößen, deren arithmetischer Mittelwert über längere Zeit Null beträgt. Dem Schall- oder Schwingungsvorgang können hohe Gleichanteile überlagert sein. So zeigt Bild 1, daß der Schalldruck dem Gleichdruck des Ausbreitungsmediums (in der Regel Luft) überlagert ist. Ähnliche Verhältnisse liegen bei der Schwingbeschleunigung vor, zu der sich die Erdbeschleunigung vektoriell addiert. Bei Schall- und Schwingungsmessungen wird jedoch immer nur die Wechselkomponente betrachtet. Die Meßgeräte sind in der Regel so ausgelegt, daß sie auf die überlagerten Gleichanteile nicht ansprechen.

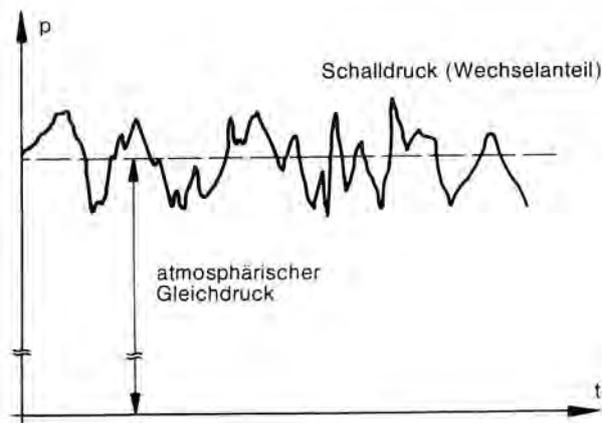


Bild 1: Überlagerung von atmosphärischem Gleichdruck und Schallwechseldruck

In einigen Fällen ist unmittelbar der Zeitverlauf $p(t)$, $a(t)$ usw. von Interesse; wesentlich häufiger ist jedoch nur die Stärke des Schall- oder Schwingungsvorgangs gefragt, ohne daß Einzelheiten der Zeitstruktur interessieren. Hierzu wird der Effektivwert (quadratische Mittelwert) gebildet, der zum Beispiel im Falle des Schalldrucks folgender Beziehung folgt:

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (3)$$

- mit $p(t)$ = Momentanschalldruck
- \tilde{p} = Effektivwert des Schalldrucks
- T = Mittelungszeit

Um die Meßwerte zumindest grob an die Reaktion der zu untersuchenden Systeme (Mensch, Maschine, Bauwerk) anzupassen, sind für häufig vorkommende Meßaufgaben zusätzlich bestimmte vereinheitlichte Frequenz- und Zeitbewertungen vorgeschrieben. So gibt es für Schallpegelmeßgeräte die Frequenzbewertungskurven A, B, C und D und die Zeitbewertungen Langsam (Slow, S), Schnell (Fast, F) und Impuls (I) [4], [5]. Auch für Schwingungsmeßgeräte sind der-

artige Bewertungskurven eingeführt worden, so zum Beispiel zur Beurteilung von Ganz- oder Teilkörperschwingungen in ihrer Wirkung auf den Menschen [6], [7]. Bei detaillierten Untersuchungen ist es üblich, den Schall- oder Schwingungsvorgang mit Hilfe von Bandpässen (vorzugsweise Terz- oder Oktavfilter [8]) in seine spektralen Anteile aufzulösen, um daraus Aussagen über Ursachen und Gegenmaßnahmen abzuleiten.

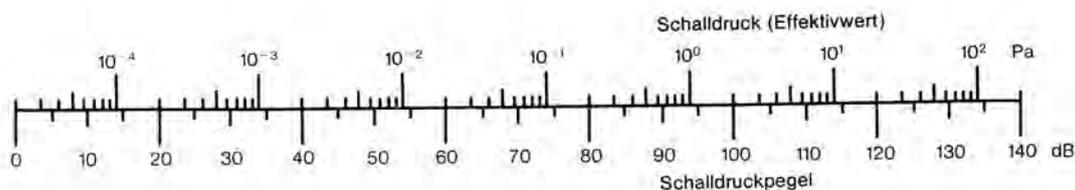
Der zu erfassende Wertebereich ist besonders beim Schalldruck außerordentlich groß (mehr als 6 Zehnerpotenzen); es kommen recht unhandliche Zahlenwerte zustande. Als Ausweg wurde der logarithmische Pegelmaßstab eingeführt, der heute in der Akustik durchweg und in der Schwingungstechnik gelegentlich zur Anwendung kommt. Das Grundprinzip der Pegeldarstellung besteht in der Normierung des Meßwertes durch Verhältnisbildung mit einem festen Bezugswert und der anschließenden Überführung in den logarithmischen Maßstab. So gilt für den Schalldruckpegel L

$$L = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

mit \tilde{p} = Effektivwert des Schalldrucks
 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa Bezugswert

Wie Bild 2 zeigt, ergibt sich durch den Übergang in den Pegelmaßstab für praxisübliche Schallereignisse eine handliche Werteskala zwischen 0 dB und etwa 140 dB. Allerdings müssen nunmehr bei allen Rechenoperationen (Mittelwertbildung, Addition mehrerer Schallquellen, Berücksichtigung von Verstärkung und Dämpfung) die Regeln für den Umgang mit logarithmischen Größen beachtet und eingehalten werden.

Bild 2: Nomogramm zur Umrechnung des Schalldrucks in den Schalldruckpegel und umgekehrt. Einheit des Druckes: [p] = 1 Pa = 1 N/m²



Häufig ist der Schalldruck oder die Schwingungskenngröße nur ein Zwischenprodukt auf dem Wege zum eigentlichen Meßergebnis, das ebenfalls in linearem Maßstab oder im Pegelformat gefragt sein kann. Je nach Meßproblem gibt es eine Vielzahl abgeleiteter Kenngrößen, von denen die folgende Übersicht nur die wichtigsten nennen kann:

- Kenngrößen der Schallimmission am Aufenthaltsort von Menschen
- Kenngrößen der Schallemission von akustischen Quellen
- Raum- und bauakustische Kenngrößen
- Kenngrößen von Sendern und Empfängern der Schall- und Schwingungstechnik
- Schwingungstechnische Kenngrößen
- Kenngrößen für den Zustand einer Maschine (Maschinen-diagnose) oder für den Ablauf eines Prozesses (Prozeß-analyse)

Die detaillierte Darstellung aller Meßprobleme und Kenngrößen würde den gegebenen Rahmen bei weitem überschreiten, deshalb sei hierzu auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, die in ausreichender Breite verfügbar ist ([9] bis [14]).

3.2. Aufbau einer Meßkette im Bereich von Luft- und Körperschall

Meßketten für Luft- und Körperschall (Schwingungen) weisen unabhängig von der konkreten gerätetechnischen Realisierung immer die in Bild 3 dargestellte Grundstruktur auf. Das gilt unabhängig davon, ob die einzelnen Funktionseinheiten in einem Kompaktgerät vereinigt sind (tragbarer Schallpegel- oder Schwingungsmesser, Echtzeitanalysator) oder ob die Meßkette aus getrennten Einschüben oder Einzelgeräten zusammengeschaltet wird (Laborgerätesystem der Schall- und Schwingungstechnik des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden).

Bedienung und Kalibrierung von Kompaktgeräten werden in den zugehörigen Bedienungsanleitungen ausführlich beschrieben. Für die Anwendung der Geräte ist es durchaus nicht unbedingt erforderlich, die Funktion der einzelnen Baugruppen zu verstehen.

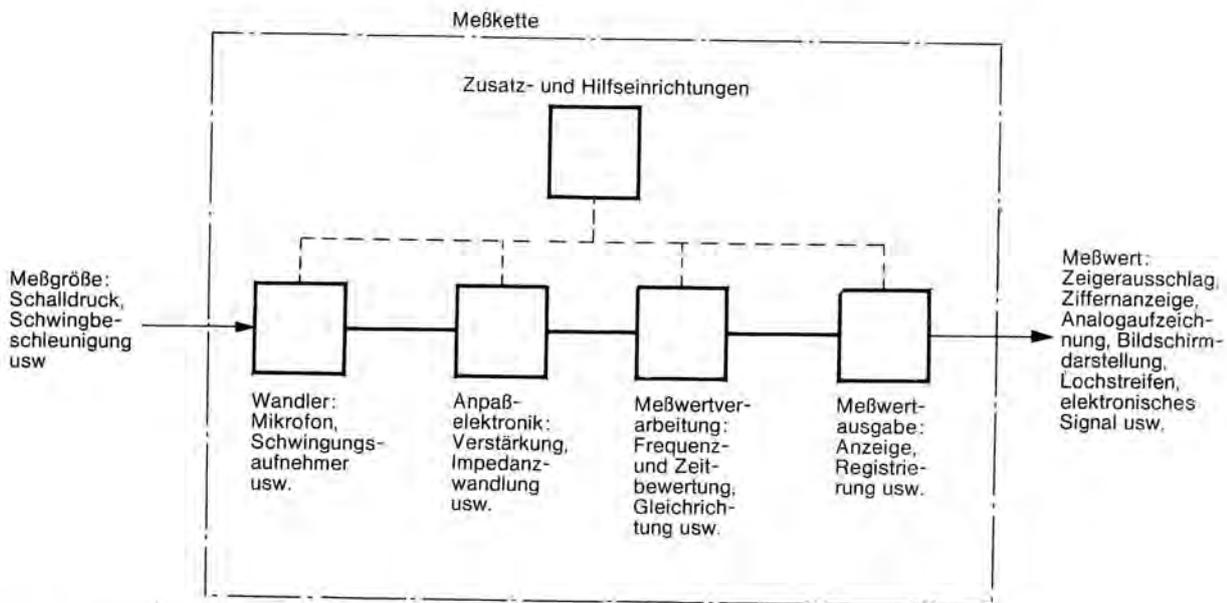
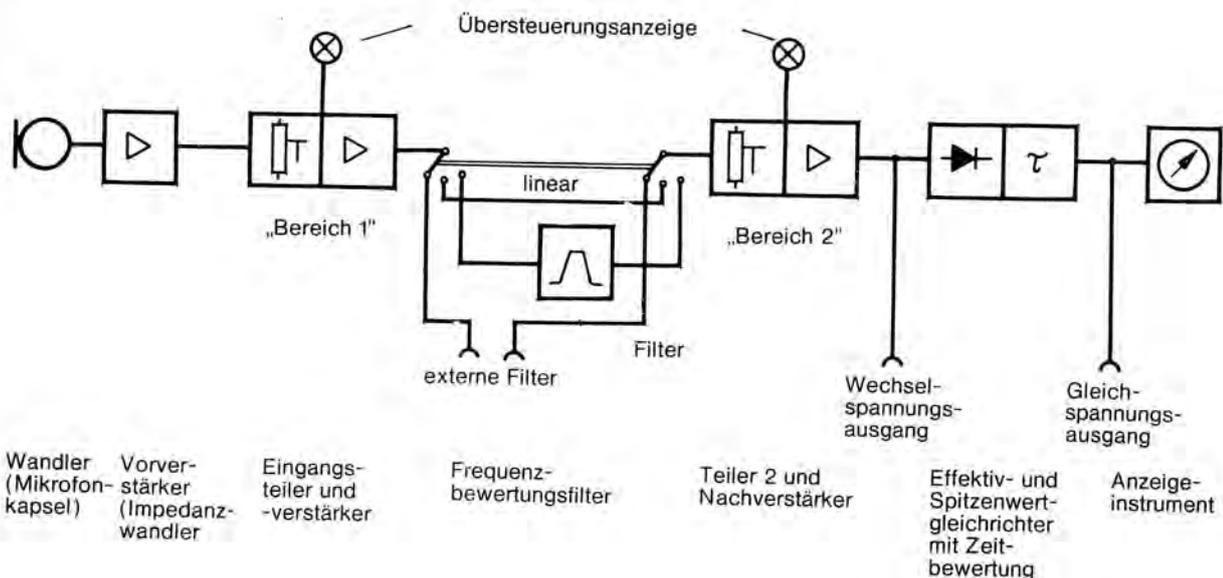


Bild 3: Grundelemente einer Meßkette für Luft- und Körperschall

Anders ist die Situation jedoch bei Meßketten, die aus Einschüben und/oder Einzelgeräten zusammengesetzt sind. So erlaubt das Laborerätssystem der Schall- und Schwingungsmeßtechnik eine Vielzahl unterschiedlicher Meß- und Steuersignalverbindungen zwischen den Funktionsblöcken zur Lö-

sung der verschiedenartigsten Meßaufgaben. Die häufigsten Konfigurationen werden durch spezielle Meßplatzbeschreibungen erfaßt [2], jedoch können sich durchaus noch weitere Zusammenschaltungen als zweckmäßig erweisen, wenn es die konkrete Situation erfordert. In diesem Fall ist es un-

Bild 4: Blockschaltbild eines Schallpegelmeßgerätes



umgänglich, daß der Anwender der Geräte über gewisse Grundkenntnisse der Arbeitsweise und der Leistungsgrenzen verfügt, um eine optimale Ausnutzung der gerätetechnischen Möglichkeiten zu sichern und Fehleinstellungen zu vermeiden.

Die wichtigsten Funktionen sollen nachfolgend am Beispiel eines Schallpegelmeßgerätes näher erläutert werden. Bild 4 zeigt das Blockschaltbild eines solchen Gerätes.

Der **Wandler** — hier eine Mikrofonkapsel — wandelt die zu messende physikalische Größe — den Schalldruck — in eine analoge elektrische Spannung um. Der folgende **Vorverstärker**, der grundsätzlich möglichst nahe beim Wandlerelement anzuordnen ist, wirkt als Impedanzwandler und paßt den hohen Innenwiderstand des Wandlerelements an den vergleichsweise niedrigen Eingangswiderstand des ersten Verstärkers an. Darüber hinaus ermöglicht er das Einschalten von Kabeln zwischen der Mikrofoneinheit (Kapsel und Vorverstärker) und dem eigentlichen Gerät.

Der Bereich der möglichen Eingangsspannungen ist außerordentlich groß und reicht von etwa $10 \mu\text{V}$ bis zu mehr als 10 V . Im **Eingangsverstärker**, der extrem rauscharm aufgebaut sein muß, wird die Signalwechselspannung durch Verstärkung oder Dämpfung auf ein solches Niveau gebracht, daß sie durch die nachfolgenden Funktionseinheiten optimal verarbeitet werden kann. Zur Anpassung an die gegebene Meßsituation läßt sich die Verstärkung mit dem Schalter „Bereich 1“ in Stufen zu 10 dB grob umschalten. Für die Kalibrierung ist außerdem eine kontinuierliche Feineinstellmöglichkeit (Einstellregler ∇) vorgesehen.

Es folgen die **Filterbaugruppen** zur Frequenzbewertung der schalldruckproportionalen Eingangsspannung. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den standardisierten Frequenzbewertungsfiltern A, B, C und D, die lediglich das gegenseitige Gewicht verschiedenfrequenter Schallanteile verändern, und den Bandfiltern (Terz-, Oktav- und Schmalbandfilter) zur Durchführung von Frequenzanalysen. Die Filter können im Schallpegelmessgerät eingebaut oder als separate Einheit ausgeführt sein. In der Betriebsart „Linear“ (Signal unter Umgehung der Filter direkt durchgeschaltet) läßt sich der Schalldruck breitbandig und frequenzunabhängig messen; die Frequenzgrenzen werden hierbei durch die Eigenschaften des Mikrofons und der anderen Elektronikbaugruppen bestimmt.

Der **Nachverstärker** ist erforderlich, um die im Filter stark gedämpften Signalanteile wieder auf ein für die Anzeige ausreichendes Niveau anheben zu können. Außerdem wird er zur Messung sehr kleiner Pegel benötigt. Auch hier ist die Verstärkung umschaltbar ausgeführt. Für Eingangs- und Nachverstärker sind Übersteuerungsanzeigen vorgesehen, die ansprechen, wenn unzulässig große Signalamplituden auftreten, die zu Übersteuerungen führen.

In der **Gleichrichterbaugruppe** wird der Effektivwert, bei einigen Geräten auch wahlweise der Spitzenwert der Signalspannung gebildet. Für Schallpegelmeßgeräte ist die Trägheit der Effektivwertbildung in Form der Zeitbewertungen Langsam (Slow, S), Schnell (Fast, F) und Impuls (I) durch Standards festgelegt. Die Ausgangsspannung der Gleich-

richterbaugruppe kann dem Effektivwert (oder Spitzenwert) der Signalwechselspannung oder aber dem Spannungspegel proportional sein.

Entsprechend ist die Skala des nachfolgenden **Anzeigeinstruments**, das zur Ausgabe der Meßwerte dient, entweder in Spannungs- (Schalldruck-) oder in Pegelwerten linear unterteilt. Manche Geräte erlauben die Umschaltung zwischen beiden Abbildungsmaßstäben. Die logarithmische Darstellung (Pegelmaßstab) gestattet in der Regel die Erfassung eines wesentlich größeren Wertebereichs ohne Meßbereichsumschaltung.

Am **Wechselspannungsausgang** steht das frequenzbewertete, aber noch nicht gleichgerichtete Meßsignal für den Anschluß von Oszilloskopen, Direktschreibern, Pegelschreibern, Abhöreinrichtungen usw. zur Verfügung. Das Signal am **Gleichspannungsausgang** ist zusätzlich gleichgerichtet und zeitbewertet; es dient zur Ansteuerung weiterer Geräte der Meßwertverarbeitung und -speicherung wie Analog-Digital-Umsetzer, XY-Schreiber oder Grenzwertmelder.

3.3. Zusammenwirken von Funktionsblöcken in einer Meßkette

3.3.1. Übertragungsfaktor und Übertragungsmaß

Die im Bild 4 dargestellten Funktionsblöcke sind als sogenannte „Vierpole“ aufzufassen, deren Funktion durch den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße beschrieben werden kann. Bei rein elektrischen Baugruppen treten Strom, Spannung oder Ladung als Ein- und Ausgangsgrößen auf, während zum Beispiel bei einem Mikrofon auf der Eingangsseite die Schallfeldgrößen Schalldruck und Schallschnelle einwirken.

In der Regel besteht zwischen den Ein- und den Ausgangsgrößen einer Funktionseinheit ein linearer Zusammenhang. Der Vierpol läßt sich dann durch den Proportionalitätsfaktor zwischen Ein- und Ausgangsgröße kennzeichnen, der als **Übertragungsfaktor** B gekennzeichnet wird. So gilt zum Beispiel für den Leerlaufübertragungsfaktor eines Meßmikrofons für senkrechten Einfall ebener Schallwellen die Beziehung

$$B_L = \frac{\tilde{u}_L}{\tilde{p}_f} \quad (5)$$

mit \tilde{u}_L = Leerlauf-Ausgangsspannung
 \tilde{p}_f = Schalldruck im freien Schallfeld

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, daß sich das Zusammenwirken mehrerer in Kette geschalteter Vierpole besonders einfach darstellen läßt, wenn die Übertragungskenngrößen im Pegelmaßstab, also in logarithmischer Form vorliegen. Da der Logarithmus nur von einem dimensionslosen Wert gebildet werden kann, muß vorher eine Normierung durch Verhältnisbildung mit einer Bezugsgröße erfolgen. Auf diese Weise ergibt sich das **Übertragungsmaß** G (bei Mikro-

fonen häufig a). Für den betrachteten Fall eines Mikrofons lautet die Beziehung für das Leerlauf-Übertragungsmaß

$$\begin{aligned} a_L &= 20 \cdot \lg \left(\frac{B_L}{B_{EO}} \right) \text{ dB} \\ &= \left[20 \lg \left(\frac{\tilde{u}_L}{u_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) + 134 \right] \text{ dB} \\ &= L_u - L + 134 \text{ dB} \end{aligned} \quad (6)$$

mit

$$L_u = 20 \lg \left(\frac{\tilde{u}_L}{u_0} \right) \text{ dB} \quad \text{Spannungspegel}$$

$$L = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{ dB} \quad \text{Schalldruckpegel}$$

und den Bezugsgrößen

$$B_{EO} = 10 \text{ mV/Pa}$$

$$u_0 = 1 \text{ V}$$

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Gelegentlich sind auch andere Bezugswerte üblich. Der Zuschlag von 134 dB in der zweiten und dritten Zeile von Gl. (6) berücksichtigt die unterschiedliche Normierung einmal auf B_{EO} , zum anderen auf u_0 und p_0 .

Auf analoge Weise lassen sich für alle Wandler und Funktionsgruppen Übertragungsmaße angeben. Bei Beschleunigungsaufnehmern beträgt der Bezugswert des Übertragungsfaktors meist $a_0 = 1 \text{ mV/m s}^{-2}$. Für Spannungsverstärker ist die Festlegung eines Bezugswertes nicht erforderlich, da Ein-

und Ausgangsgröße die gleiche Dimension $[u] = 1 \text{ V}$ aufweisen. Das Übertragungsmaß ist hierbei identisch mit dem im Sprachgebrauch eingeführten Begriff „(logarithmische) Verstärkung“.

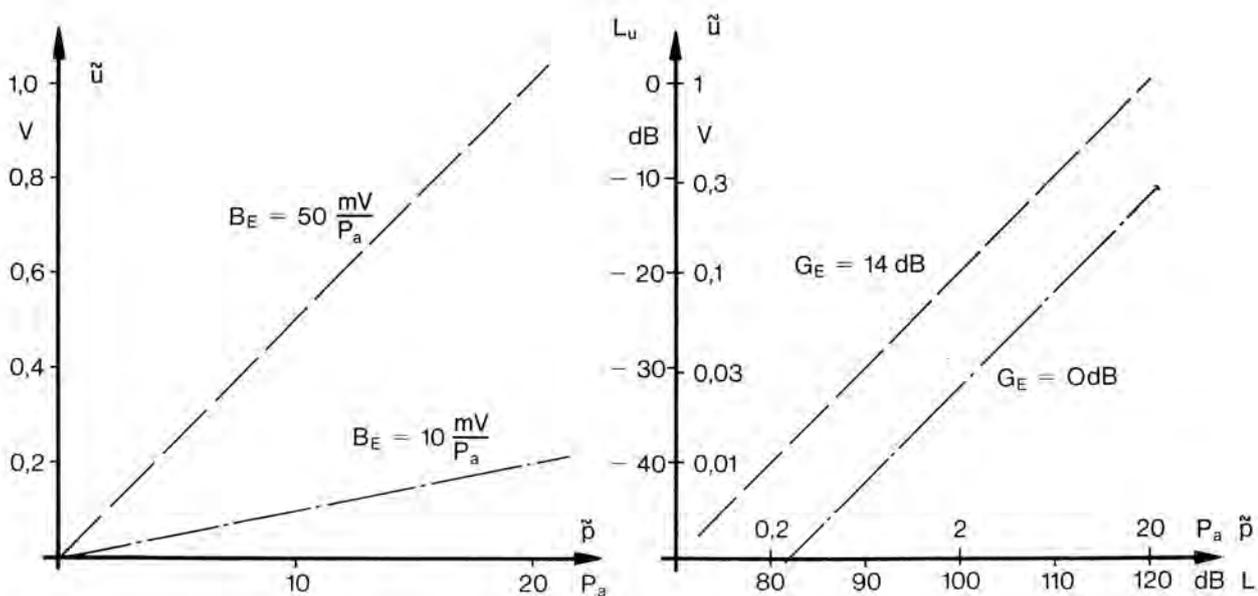
Bild 5 gibt an, welche Konsequenzen der Umgang mit den verschiedenen Übertragungskenngrößen mit sich bringt. In der linken linearen Darstellung kennzeichnet der Übertragungsfaktor den Anstieg der Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße angibt. Die Kennlinien gehen vom Nullpunkt aus. Rechts ist der gleiche Sachverhalt in logarithmischem Maßstab dargestellt. Unterschiedliche Übertragungsmaße äußern sich als Parallelverschiebung der Kennlinien, die die gleiche Neigung aufweisen. Der Nullpunkt wird bei dieser Darstellungsart unterdrückt.

3.3.2. Zusammenschaltung von Vierpolen

Eine Meßkette läßt sich in der Regel als Reihenschaltung verschiedener Funktionseinheiten (Vierpole) darstellen. Für den Anwender ist in erster Linie der resultierende Übertragungsfaktor wichtig, der den Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße (Meßgröße, zum Beispiel Schalldruck) und der Ausgangsgröße (zum Beispiel Zeigerausschlag oder Ausgangsspannung) beschreibt.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 6 die Funktionseinheiten eines Schallpegelmeßgerätes als Vierpole dargestellt und zur kompletten Meßkette zusammengefügt worden. Unter bestimmten Voraussetzungen (rückwirkungsfreie Zusammenschaltung oder Einhaltung definierter Anschlußbedingungen) gelten für die Meßkette folgende Beziehungen:

Bild 5: Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße eines Mikrofons links in linearer, rechts in logarithmischer Darstellung



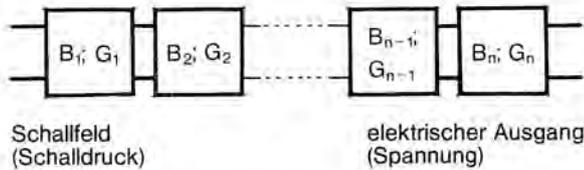


Bild 6: Darstellung eines Schallpegelmeßgerätes als Kettenschaltung von Vierpolen

$$B_{ges} = \tilde{u}_L / \tilde{p}_I = B_1 \cdot B_2 \cdot \dots \cdot B_{n-1} \cdot B_n$$

$$= \prod_{i=1}^n B_i \quad (7a)$$

$$G_{ges} = 20 \cdot \lg \left(\frac{\tilde{u}_L / \tilde{p}_I}{B_{EO}} \right) \text{ dB} = G_1 + G_2 + \dots + G_{n-1} + G_n$$

$$= \sum_{i=1}^n G_i \quad (7b)$$

Die Vorteile des logarithmischen Maßstabs treten hierbei klar zutage: Die Übertragungskenngrößen sind additiv miteinander verknüpft und damit wesentlich besser zu überschauen.

Bisher wurden die Übertragungskenngrößen als konstant angenommen. Tatsächlich ist diese Voraussetzung jedoch nur in einem beschränkten Amplituden- und Frequenzbereich erfüllt. So deutet Bild 7 an, daß der gewünschte lineare Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße nach oben hin durch Übersteuerungserscheinungen begrenzt wird (Bereich III), während bei niedrigen Amplituden die unvermeidlichen Störspannungen (Bereich I) den nutzbaren Arbeitsbereich einschränken.

Bild 7: Begrenzung des nutzbaren Amplitudenbereichs durch Eigenrauschen (I) und Übersteuerung (III)

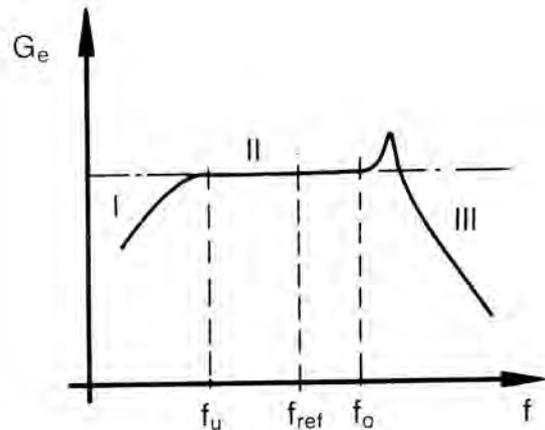
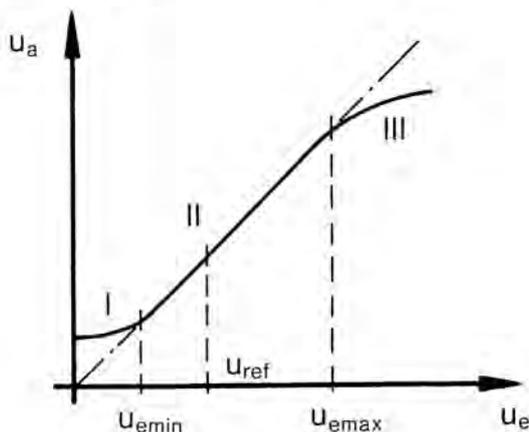


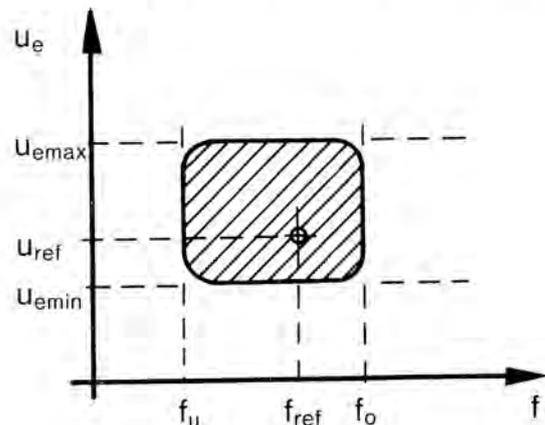
Bild 8: Frequenzabhängigkeit des Übertragungsfaktors (Beispiel)

Weiterhin weisen alle Vierpole, ganz ausgeprägt die elektroakustischen und elektromechanischen Wandler, ein bestimmtes Frequenzverhalten auf. Bild 8 zeigt am Beispiel des stilisierten Frequenzganges eines Kondensatormikrofons, daß das Übertragungsmaß jenseits der Grenzen des Arbeitsbereichs meist abfällt (Bereich I: Tiefenabfall durch Druckausgleichskapillare), jedoch ist auch das Auftreten resonanzartiger Anhebungen (Bereich III) nicht ausgeschlossen.

Eine fehlerarme Messung ist nur im Bereich zwischen einer minimalen und einer maximalen Eingangsamplitude $u_{e \min}$ und $u_{e \max}$ sowie einer unteren und einer oberen Frequenzgrenze f_u und f_o möglich. Diese Abschnitte der Kennlinien sind in den Bildern 7 und 8 jeweils als „Bereich II“ gekennzeichnet.

Die Kombination der Aussagen der Bilder 7 und 8 führt zu der im Bild 9 durch Schraffur markierten „Arbeitsfläche“, die sämtliche von der Meßkette ordnungsgemäß verarbeiteten Kombinationen von Eingangsamplitude und Frequenz um-

Bild 9: „Arbeitsfläche“ eines Gerätes oder einer Meßeinrichtung als Bereich auswertbarer Kombinationen von Eingangsgröße und Frequenz



faßt. Genau genommen ist auch diese Darstellung nur eine Näherung, jedoch verzichtet man in der Regel auf die Erfassung weiterer Einflußgrößen wegen ihres vergleichsweise geringen Einflusses. Die Arbeitsfläche muß durchaus nicht immer ein Rechteck bilden; es sind auch schräge oder gekrümmte Begrenzungen möglich.

Die Kalibrierung mit einem definierten Signal der Amplitude u_{ref} und der Frequenz f_{ref} erfaßt immer nur einen Punkt der Arbeitsfläche in Bild 9. Ist die Arbeitsfläche nicht bekannt und auch aus der Gerätedokumentation nicht zu entnehmen oder besteht der Verdacht auf eine fehlerbedingte Veränderung, dann kann man durch systematische Variation von Amplitude und Frequenz die Grenzen der Arbeitsfläche meßtechnisch ermitteln. Qualifizierte Anwender, die über die nötigen Meßmittel verfügen, können diese Prüfung unter Umständen selbst ausführen.

3.4. Anpassung der Wandler an das Meßgerät

Die elektronischen Funktionsblöcke weisen in der Regel vereinheitlichte Anschlußbedingungen auf, so daß ihre Zusammenschaltung keine Probleme bereitet. Anders ist jedoch die Situation bei den elektroakustischen und elektromechanischen Wandlern, deren Eigenschaften als gegeben angesehen werden müssen. Auch wird die Situation durch den Einsatz unterschiedlichen Zubehörs unübersichtlich.

Zur Erleichterung der Anwendung gibt der vorliegende Abschnitt eine kurze Einführung in das Verhalten der vom VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ benutzten Kondensator-Meßmikrofone und piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer. Keramische Meßmikrofone, die sich in vielen Punkten ähnlich wie Kondensatormikrofone verhalten, werden nicht behandelt, da sie fest am Schallpegelmessgerät angebracht sind, so daß keine Anschlußprobleme auftreten. Allgemeine Gesichtspunkte des Einsatzes von Meßmikrofonen und Zubehör sind in einer Applikationsschrift [15] ausführlich dargestellt.

3.4.1. Kondensator-Meßmikrofon

In Bild 10 ist das vereinfachte Ersatzschaltbild eines vollständigen Kondensator-Meßmikrofons dargestellt. Während Mikrofonskapsel und Vorverstärker (Impedanzwandler) immer vorhanden sind, entfällt das Mikrofonskabel bei Anbringung des Mikrofons direkt am Gehäuse des Schallpegelmessers. Ein Adapter kommt nur dann zur Anwendung, wenn beim Einsatz von Mikrofonskapseln und Vorverstärkern unterschiedlicher Durchmesser eine mechanische Anpassung erforderlich ist.

In den Datenblättern werden eine Reihe unterschiedlicher Kennwerte genannt, die bei der Kalibrierung eine Rolle spielen. Zu beachten ist, daß in den Datenblättern des VEB Mikrofontechnik Gefell und in den Gerätebeschreibungen des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden für das Mikrophonübertragungsmaß das Formelzeichen a (anstelle von G) eingeführt ist.

Die Wandlereigenschaften der Kapsel werden durch die bereits vorgestellten Größen Leerlaufübertragungsfaktor B_L

$$B_L = \frac{\tilde{u}_L}{\tilde{p}_F} \quad (8a)$$

und Leerlaufübertragungsmaß a_L

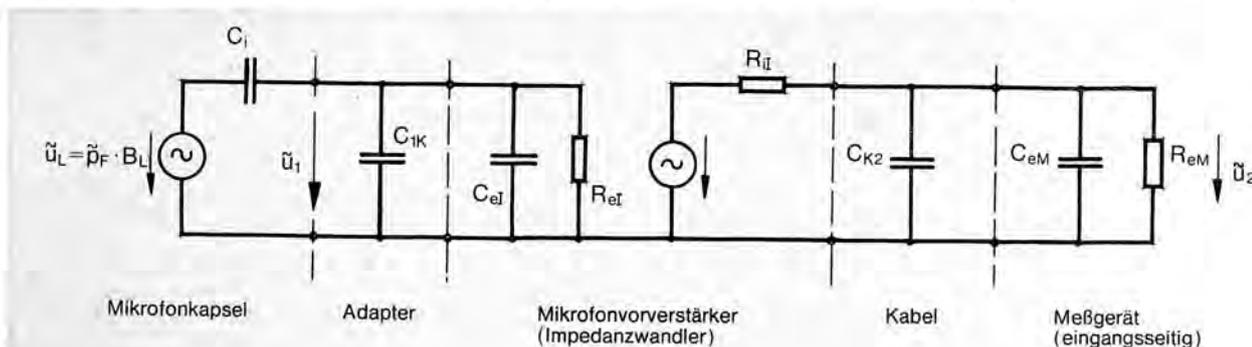
$$a_L = 20 \cdot \lg \left(\frac{B_L}{B_{EO}} \right) \text{ dB} \quad (8b)$$

mit $B_{EO} = 10 \text{ mV/Pa}$

gekennzeichnet. Die Werte gelten jeweils nur für eine bestimmte Polarisationsspannung, die angegeben sein muß.

Im unbelasteten Zustand ist die Leerlaufspannung u_L mit der Spannung u_I (links im Bild 10) identisch. Das trifft in guter Näherung auch bei Belastung der Kapsel mit der (extrem hohen) Eingangsimpedanz des Vorverstärkers (Impedanzwandlers) zu. Der Einfluß der Adapterkapazität ist auf Grund der angewendeten Schutzschirmtechnik sehr gering.

Bild 10: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Kondensator-Meßmikrofons bis zum Meßgeräteingang



Für den Vorverstärker (Impedanzwandler) lauten die entsprechenden Übertragungskenngrößen

$$B_{Vn} = \frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} \quad (9a)$$

und

$$a_{Vn} = 20 \cdot \lg \left(\frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} \right) \text{ dB} \quad (9b)$$

Zu beachten ist, daß beim Vorverstärker Ein- und Ausgangsgröße gegenüber der sonst üblichen Angabe vertauscht sind. Grund für diese Festlegung ist die Tatsache, daß bei den üblichen Vorverstärkern die Ausgangsspannung etwas niedriger als die Eingangsspannung ist, also in Wirklichkeit eine Spannungsdämpfung erfolgt (verstärkt wird durch den Impedanzwandler die verfügbare Signalleistung). Um keine negativen Übertragungsmaße zu erhalten, tauscht man Ein- und Ausgangsgröße gegeneinander aus. Ein Wert von $a_{Vn} = 0,5 \text{ dB}$ bedeutet demzufolge, daß der Spannungspegel durch den Vorverstärker um $0,5 \text{ dB}$ herabgesetzt wird.

Die Übertragungskenngrößen a_{Vn} und B_{Vn} berücksichtigen bereits den (recht geringen) Einfluß des Eingangswiderstandes des nachfolgenden Meßgerätes (bei Schallpegelmeßgeräten des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden mit $100 \text{ k}\Omega$ angesetzt) sowie die frequenzunabhängige Spannungsteilung zwischen der Kapselkapazität C_i und der Eingangskapazität C_{eI} des Impedanzwandlers. Dabei bezeichnet der Index n die durchschnittliche Kapselkapazität, für die der Wert gilt. Entsprechend den praktischen Einsatzbedingungen werden Werte angegeben für

- $C_i = 5,6 \text{ nF}$ (Beschleunigungsadapter B 63, stellvertretend für niederohmige Einspeisung)
- $= 68 \text{ pF}$ (Einzellokapsel MK 102)
- $= 22 \text{ pF}$ (Halbzollkapsel MK 201)
- $= 6 \text{ pF}$ (Viertellokapsel MK 301)

Die Meßwerte von a_{Vn} , wie sie im Prüfprotokoll angegeben sind, beziehen sich auf eine Meßfrequenz von 1 kHz . Tatsächlich ist das Übertragungsmaß des Impedanzwandlers jedoch frequenzabhängig, wobei sich insbesondere die Spannungsteilung zwischen der Kapselkapazität C_i und dem Eingangswiderstand R_{eI} des Impedanzwandlers auswirkt. Wie aus der vereinfachten Ersatzschaltung des Bildes 11 hervorgeht, bewirkt diese Spannungsteilung eine Absenkung der Übertragungskenngrößen nach der Beziehung

$$\frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_z/f)^2}} \quad (10)$$

mit der 3-dB-Grenzfrequenz

$$f_z = \frac{1}{2\pi C_i R_{eI}}$$

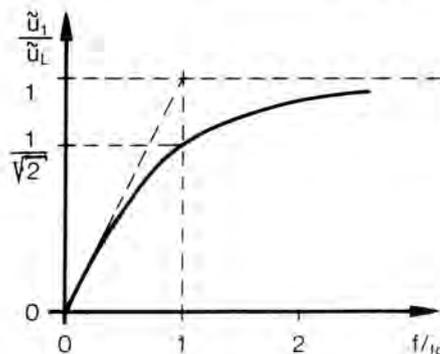
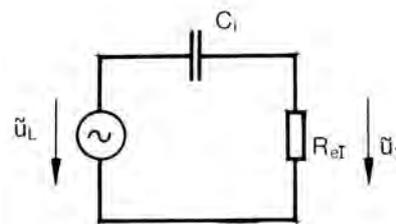


Bild 11: Stark vereinfachtes Ersatzschaltbild für das Zusammenwirken von Kapselkapazität C_i und Eingangswiderstand R_{eI} des Impedanzwandlers sowie Darstellung der frequenzabhängigen Spannungsteilung

Als Beispiel für die praktische Auswirkung ist in Bild 12 die Abhängigkeit des reziproken Übertragungsfaktors eines Mikrofonvorverstärkers MV 201 als Funktion der Frequenz dargestellt.

Die Übertragungseigenschaften des vollständigen Meßmikrofons werden durch den Betriebsübertragungsfaktor

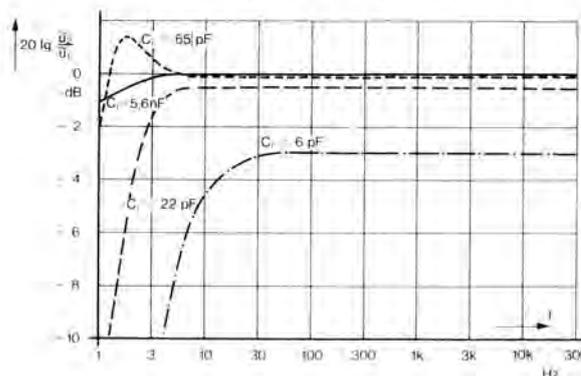
$$B_K = \frac{\tilde{u}_2}{p_j} \quad (11a)$$

und das Betriebsübertragungsmaß

$$a_K = 20 \cdot \lg \left(\frac{B_K}{B_{EO}} \right) \text{ dB} \quad (11b)$$

mit $B_{EO} = 10 \text{ mV/Pa}$

Bild 12: Abhängigkeit des reziproken Übertragungsfaktors $u_2/u_1 = 1/B_{Vn}$ eines Mikrofonvorverstärkers MV 201 von der Frequenz für verschiedene Quellenkapazitäten C_i als Parameter (Beispiel)



charakterisiert. Mit den Übertragungskenngrößen der Mikrofonskapsel und des Vorverstärkers (Impedanzwandlers) stehen diese Werte in folgender Beziehung:

$$B_K = B_L / B_{VH} \quad (12a)$$

und

$$a_K = a_L - a_{VH} \quad (12b)$$

Zu beachten ist noch, daß die obere Grenze des Bereichs meßbarer Pegel (das heißt die obere Grenze der „Arbeitsfläche“ nach Bild 9) von der Frequenz und der kapazitiven Belastung des Vorverstärkers durch die Kapazität des angeschlossenen Kabels abhängt. Als Beispiel zeigt Bild 13 die frequenzabhängige Verminderung der oberen Aussteuerungsgrenze des Mikrofonvorverstärkers MV 201 mit der Kabellänge als Parameter. Beim Überschreiten der Aussteuerungsgrenze entstehen starke Verzerrungen, die eine exakte Messung nicht mehr zulassen.

3.4.2. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer — direkt angeschlossen

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer sind ebenfalls Wandler mit einem kapazitiven Innenwiderstand. Zur Auswertung des Aufnehmersignals sind in der Meßpraxis zwei Verfahren nebeneinander in Gebrauch:

- Spannungsmessung und
- Ladungsmessung.

In beiden Fällen ist die erforderliche Elektronik meist im Schwingungsmeßgerät (Integrierverstärker, Ladungsverstärker) angeordnet; das Anschlußkabel wird zwischen Aufnehmer und Meßgerät eingefügt. Bild 14 zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild dieser Anordnung.

Spannungsempfindliche Meßgeräte (Integrierverstärker) besitzen einen sehr hohen Eingangswiderstand R_{eM} und eine

Bild 13: Verminderung der Aussteuerungsgrenze des Mikrofonvorverstärkers MV 201 als Funktion der Frequenz mit der Länge des Mikrofonskabels als Parameter. Der Klirrfaktorbeitrag des Vorverstärkers beträgt an der Aussteuerungsgrenze 3%; Referenzspannung für Ordinatenmaßstab: 25 V

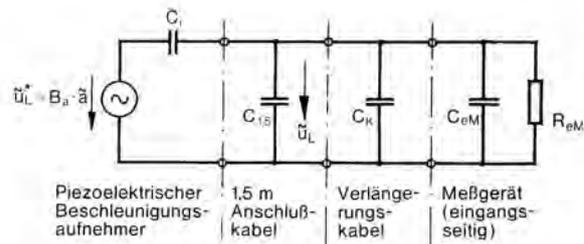
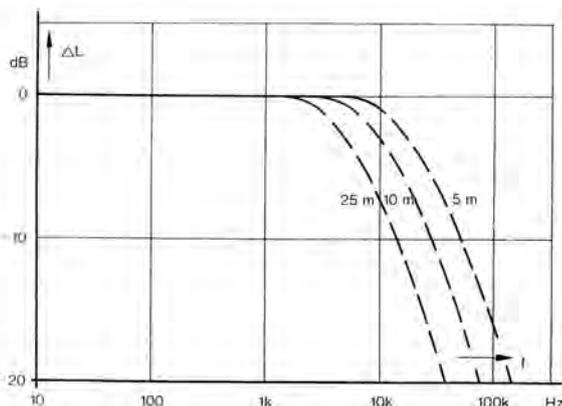


Bild 14: Elektrisches Ersatzschaltbild für den Anschluß eines piezoelektrischen Schwingungsaufnehmers an ein Meßgerät

meist vernachlässigbar kleine Eingangskapazität C_{eM} . In diesem Fall — bei der Spannungsmessung — bewirkt die Kapazität des Anschlußkabels durch kapazitive Spannungsteilung eine frequenzunabhängige Herabsetzung der Aufnehmerspannung und damit des Übertragungsfaktors

$$B_{uL} = \tilde{u}_L / a \quad (13)$$

Da jedoch ein Anschlußkabel zum Betreiben des Aufnehmers unerlässlich ist, wird der Übertragungsfaktor in den Kennblättern von vornherein unter Berücksichtigung des mitgelieferten 1,5 m langen Anschlußkabels angegeben. Bei größeren Kabellängen (Einfügen eines Verlängerungskabels mit der Kapazität C_K) reduziert sich der wirksame Übertragungsfaktor auf den Wert B_{uK} :

$$B_{uK} = B_{uL} \cdot \frac{C_i^*}{C_i^* + C_K} \quad (14)$$

mit

$$C_i^* = C_i + C_{1,5}$$

$$C_i = \text{Aufnehmerkapazität}$$

$$C_{1,5} = \text{Kapazität des 1,5-m-Standardkabels}$$

Ähnlich wie beim Kondensator-Meßmikrofon ergibt sich auch hier durch den endlichen Eingangswiderstand R_{eM} des Meßgerätes ein Abfall des Übertragungsfaktors in Richtung tiefer Frequenzen; die in Bild 11 dargestellten und durch Gl. (10) beschriebenen Zusammenhänge gelten sinngemäß.

Ganz anders ist die Situation bei der Ladungsmessung. Die hierzu verwendeten speziellen „Ladungsverstärker“ im Schwingungsmeßgerät weisen eine sehr große Eingangskapazität C_{eM} auf, die die Aufnehmer- und Kabelkapazitäten um ein Vielfaches übersteigt. Damit entfallen die genannten Probleme des Kabeinflusses und des Tiefenabfalls. Für die Meßwertbildung ist jetzt der Ladungsübertragungsfaktor B_q

maßgebend, der mit dem (Spannungs-) Übertragungsfaktor B_a durch folgende Beziehung verknüpft ist:

$$B_q = Q/a = B_{al} \cdot C_i^* \quad (15)$$

mit $Q = \text{Ladung}$.

Das Ausgangssignal des Ladungsverstärkers ist eine beschleunigungsproportionale Spannung, die in üblicher Weise weiterverarbeitet und ausgewertet werden kann.

3.4.3. Anschluß piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer über Adapter

Häufig besteht der Wunsch, piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer direkt an Schallpegelmessern anschließen zu können, um diese Geräte zusätzlich für Schwingungsmessungen zu nutzen. Zu diesem Zweck bieten die Hersteller von Schallpegelmessern sogenannte Schwingungs- oder Körperschalladapter an, die anstelle der Mikrofonkapsel auf den Vorverstärker zu schrauben sind. Die Adapter ermöglichen den elektrischen Anschluß des Aufnehmers an den Vorverstärker (Impedanzwandler) und sperren darüber hinaus die für die Mikrofonkapsel vorgesehene Mikrofonpolarisationsspannung, die der Beschleunigungsaufnehmer nicht benötigt.

Für die Schallpegelmeßgeräte des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden sind zwei verschiedene Körperschalladapter verfügbar.

Beim **Beschleunigungsadapter** B 63 aus dem VEB Mikrofontchnik Gefell wird das Aufnehmersignal über eine Trennkapazität von 5,6 nF dem Eingang des Mikrofonvorverstärkers zugeführt. Abgesehen von einer vernachlässigbar geringen Erhöhung der unteren Grenzfrequenz bleibt das Meßsignal unverändert; das Schallpegelmeßgerät zeigt die Schwingbeschleunigung an.

Dagegen enthält der **Geschwindigkeitsadapter** 00 009 des VEB MKD ein RC-Glied, das eine elektrische Integration des Meßsignals bewirkt. Bild 15 zeigt eine vereinfachte Ersatzschaltung dieser Anordnung. Da gemäß Gl. (2) das Zeitintegral der Beschleunigung die Schwinggeschwindigkeit ergibt, ist die Spannung am Ausgang des Adapters der Schwinggeschwindigkeit des Meßobjektes proportional:

$$\tilde{u}_V = \frac{\tilde{v} \cdot B_{al}}{\tau_0} = 2\pi \tilde{v} B_{al} f_0 \quad (16)$$

mit $\tau_0 = R_V C_V$ Zeitkonstante des Integriergliedes

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_0} \text{ Grenzfrequenz}$$

Dabei ist zu beachten, daß das Integrierglied erst oberhalb seiner Grenzfrequenz f_0 wirksam wird. Der Geschwindigkeitsadapter 00 009 hat eine Grenzfrequenz von etwa 10 Hz, so daß Schwinggeschwindigkeitsmessungen ab etwa 20 Hz mit ausreichender Genauigkeit möglich sind.

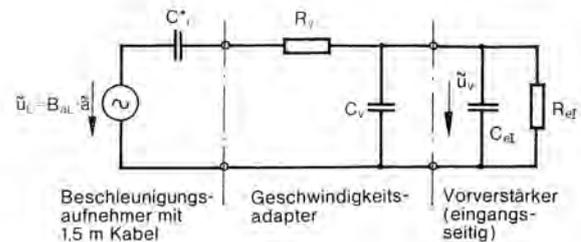


Bild 15: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild für den Anschluß eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers an einen Schallpegelmesser unter Verwendung eines Geschwindigkeitsadapters

3.5. Pegelverhältnisse innerhalb der Meßkette

Die von einem Meßmikrofon oder einem Schwingungsaufnehmer abgegebene Spannung kann je nach Situation im Bereich zwischen etwa 10 μV und mehr als 10 V schwanken. Die Verarbeitung eines derartig großen Pegelumfanges von mehr als 120 dB stellt hohe Anforderungen an den Meßverstärker, der für die Erfassung der niedrigen Signalspannungen sehr rauscharm aufgebaut sein muß, andererseits aber durch die hohen Spannungen auch nicht übersteuert werden darf.

Die Anforderungen an den Meßverstärker erhöhen sich noch dadurch, daß die Meßaufgaben der Praxis häufig die Einschaltung eines Filters in die Meßkette erfordern, wobei das Filter je nach Signalart und Frequenz nochmals eine Spannungsdämpfung zwischen 0 dB und etwa 60 dB bewirken kann.

Zur Anpassung an die unterschiedlichen Spannungsverhältnisse hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Verstärker aufzuteilen und das Filter zwischen die Teilverstärker einzufügen. Außerdem müssen beide Teilverstärker mit unabhängig voneinander einstellbaren Spannungsteilern (Bereichsschaltern) ausgestattet sein. Diese grundsätzliche Anordnung wurde bereits früher im Bild 4 vorgestellt.

Als Beispiel sind in den Bildern 16 und 17 die Pegelverhältnisse innerhalb einer Schallpegelmeßkette mit dem Mikrofonverstärker 00 011 und dem Anzeigeteil 02 022 dargestellt. Die eingezeichneten Verläufe berücksichtigen die unterschiedlichen Einstellmöglichkeiten der im Mikrofonverstärker und im Anzeigeteil enthaltenen Bereichsschalter (entspricht den Schaltern „Bereich 1“ und „Bereich 2“ bei den Präzisions-Impulsschallpegelmessern 00 017 und 00 023). Eine Ausgangsspannung von 1 V entspricht Vollauschlag am Anzeigeteil; der Anzeigebereich umfaßt 40 dB. Bei den Filtern kann es sich um externe Oktav-, Terz- oder Schmalbandfilter oder um das eingebaute Frequenzbewertungsfilter des Anzeigeteils handeln.

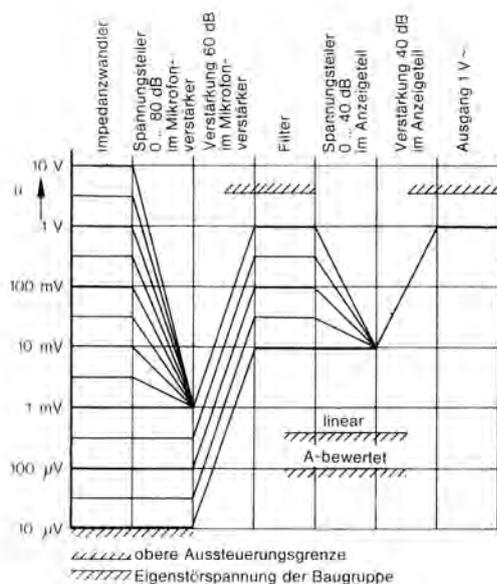


Bild 16: Pegeldiagramm einer Schallpegelmeßkette mit dem Mikrofonverstärker 00 011 und dem Anzeigeteil 02 022 in der Betriebsart „Linear“ (Filterdämpfung 0 dB)

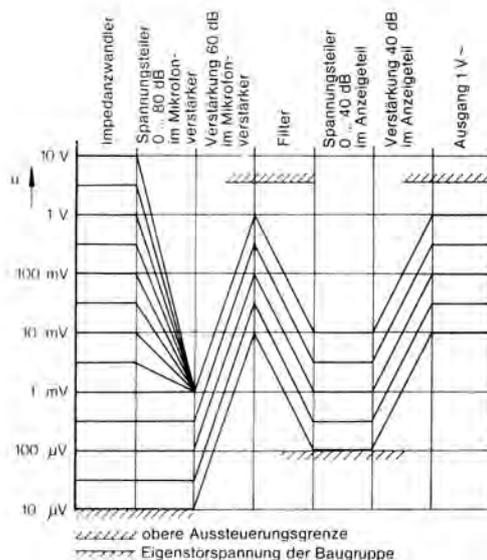


Bild 17: Pegeldiagramm der gleichen Meßkette wie in Bild 16, jedoch mit einer Filterdämpfung von 40 dB

Bild 16 gilt für den Fall, daß das Filter für das betrachtete Signal keine Dämpfung hervorruft oder abgeschaltet ist (lineare oder unbewertete Messung). Im Bild 17 wird dagegen eine Dämpfung des Meßsignals durch das Filter um 40 dB angenommen. Dieser Fall tritt dann ein, wenn der A-bewertete Schalldruckpegel eines sehr tieffrequenten Signals zu ermitteln ist oder wenn aus einem Frequenzgemisch eine sehr schwache Komponente herausgefiltert werden soll.

In beiden Pegeldiagrammen sind außerdem die Meßgrenzen angegeben, die einerseits durch die Störspannungen und andererseits durch die Aussteuerungsgrenzen der Funktionsblöcke vorgegeben werden.

Um innerhalb der Meßkette optimale Pegelverhältnisse zu gewährleisten, ist es unumgänglich, bei der Meßbereichseinstellung die nachfolgend genannte Reihenfolge einzuhalten.

Das gilt unabhängig davon, ob es sich um ein Kompaktgerät oder eine aus mehreren Funktionsblöcken zusammengesetzte Meßkette handelt,

— Einstellung der Bewertungsart „Linear“ (unbewerteter Gesamtpegel).

Ausgehend von der maximalen Dämpfung (höchster Meßbereich) ist die Dämpfung des ersten Bereichsschalters („Bereich 1“) so weit zurückzunehmen, daß ein möglichst großer Zeigerausschlag vorliegt, ohne daß eine Übersteuerung (zum Beispiel durch impulsartige Signalspitzen) auftritt.

Erst wenn die Dämpfung des ersten Bereichsschalters auf Null abgesenkt ist und die Übersteuerungsanzeige nach nicht aufleuchtet, darf der zweite Spannungsteiler („Bereich 2“) zurückgeschaltet werden. Die dadurch bedingte Empfindlichkeitserhöhung geht zu Lasten des Störspannungsabstandes (Pegeldifferenz zwischen Störspannung und Nutzsignal). In den untersten Meßbereichen kann deshalb die Eigenstörspannung in den Anzeigebereich kommen und einen Meßwert vortäuschen.

- Einschaltung der gewünschten Frequenzbewertung (Oktav-, Terz-, Schmalband- oder Frequenzbewertungsfilter). Die infolge der Filterdämpfung zurückgehende Anzeige darf nur durch Zurückschalten des zweiten Spannungsteilers wieder angehoben werden. Ein Zurückschalten des ersten Spannungsteilers würde zur Übersteuerung des ersten Verstärkers und des Filters führen.

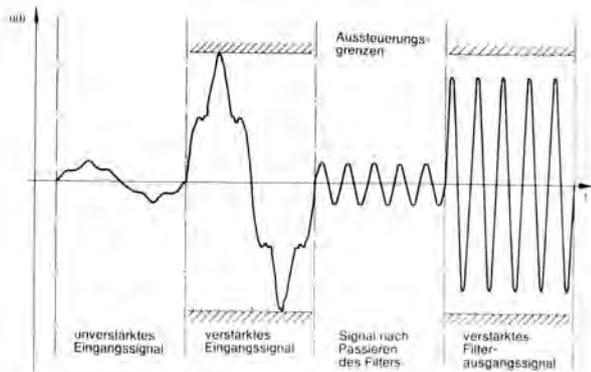


Bild 18: Signalformen und -pegel bei der Analyse einer schwachen höherfrequenten Signalkomponente aus einem stärkeren Grundsignal heraus

Das im Bild 18 dargestellte Beispiel des Herausfilterns einer schwachen hochfrequenten Signalkomponente aus einem stärkeren Grundsignal soll den Sachverhalt nochmals verdeutlichen. Das schwache Eingangssignal wird zunächst durch geeignete Einstellung des ersten Spannungsteilers so weit verstärkt, daß in Stellung „Linear“ ein möglichst großer Zeigerausschlag entsteht, ohne daß die Aussteuerungsgrenze überschritten wird.

Hinter dem Filter bleibt nur die gesuchte höherfrequente Signalkomponente zurück, während das Grundsignal vom Filter unterdrückt wird. Um das schwache Ausgangssignal so weit zu verstärken, daß wieder ein gut ablesbarer Zeigerausschlag entsteht, muß nunmehr die Dämpfung des zweiten Spannungsteilers verringert werden.

Falsch wäre es, nach dem Einschalten des Filters einen größeren Zeigerausschlag durch Zurücknahme der Dämpfung des ersten Spannungsteilers zu erzwingen. Die dadurch hervorgerufene Übersteuerung des ersten Verstärkers und des Filtereingangs ließe eine ordnungsgemäße Messung nicht mehr zu. Aber auch das zu zeitige Zurückschalten der Dämpfung des zweiten Spannungsteilers kann zu Meßfehlern führen, weil hierbei die geräteinterne Störspannung unnötig angehoben wird und den Meßwert beeinflussen oder gar überdecken kann. Die oben angeführten Einstellregeln sichern dagegen die optimale Anpassung der Meßkette an alle vorkommenden Signalarten und -pegel.

4 Meß- und Kalibrierverfahren zur Vorbereitung der Meßkette

Wie bereits erwähnt, besteht die Aufgabe der Kalibrierung in der Kontrolle und gegebenenfalls der Einstellung der Übertragungseigenschaften der Meßkette, so daß die Anzeigeeinrichtung den Meßwert zahlen- und dimensionsrichtig ausgeben kann. Dazu brauchen die Übertragungseigenschaften der einzelnen Elemente der Meßkette für sich nicht unbedingt bekannt zu sein; in erster Linie interessiert das Gesamtverhalten der Meßeinrichtung.

In der Praxis sind nebeneinander recht verschiedenartige Kalibrierverfahren in Gebrauch, die sich hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und des Zeit- und Geräteaufwandes deutlich voneinander unterscheiden.

Für Schall- und Schwingungsmeßgeräte gibt es zwei Hauptgruppen von Kalibrierverfahren:

- Akustische oder mechanische Kalibrierung, zum Beispiel
 - Absolutkalibrierung
 - Vergleichskalibrierung
 - Reziprozitätsverfahren
 - Eichgitterverfahren
- Elektrische Kalibrierung, zum Beispiel
 - Simulation eines akustischen oder mechanischen Prüfsignals durch eine Kalibrierspannung
 - Pfeifpunktkalibrierung

Während die akustische oder mechanische Kalibrierung den Wandler (Mikrofon, Aufnehmer) einbezieht, und je nach Referenznormal eine höhere Genauigkeit zuläßt, erfaßt die elektrische Kalibrierung nur die Funktionseinheiten vom Geräteeingang bis hin zur Anzeige. Wenn irgend möglich, sollte deshalb grundsätzlich der akustischen oder mechanischen Kalibrierung der Vorzug gegeben werden.

4.1. Akustische oder mechanische Kalibrierung

Bei der akustischen oder der mechanischen Kalibrierung läßt man auf den Wandler (Mikrofon, Schwingungsaufnehmer) eine Bezugsgröße einwirken, die die gleiche physikalische Erscheinungsform wie die Meßgröße hat, für die das Gerät vorgesehen ist (Luftschall bei Meßmikrofonen und Schallpegelmeßgeräten, mechanische Schwingungen bei Aufnehmern und Schwingungsmeßgeräten).

Die Bezugsgröße (zum Beispiel der Schalldruck am Meßmikrofon) oder bestimmte Eigenschaften der Meßeinrichtung (zum Beispiel das Übertragungsmaß eines Mikrofonnormals) müssen sehr genau bekannt sein. Von ihrem Fehler hängt die Gesamtunsicherheit der Kalibrierung in entscheidendem Maße ab.

4.1.1. Absolutkalibrierung

Wenn der absolute Wert der Bezugsgröße über physikalische Gesetzmäßigkeiten aus bestimmten, elementar meßbaren Grundgrößen abgeleitet wird, spricht man vom Absolutverfahren. Im Gegensatz dazu ist die im folgenden Abschnitt beschriebene Vergleichskalibrierung ein Relativverfahren, das jedoch letzten Endes auch auf das Ergebnis einer erstmaligen Absolutkalibrierung des verwendeten Normal zurückgreifen muß.

Das bekannteste akustische Absolutverfahren ist die Mikrofonkalibrierung mit dem Pistonfon. Ein mit definierter Amplitude hin- und hergehender Kolben erzeugt in einer Kammer bekannten Volumens eine Druckschwankung p :

$$\tilde{p} = \frac{\approx p \cdot S_K \cdot \hat{\xi}}{2 \sqrt{2} \cdot V_0} \quad (17)$$

mit

p = atmosphärischer Gleichdruck

S_K = Fläche des Kolbens

$\hat{\xi}$ = Schwingweg des Kolbens zwischen beiden Endpunkten

V_0 = Volumen der Kammer

\approx = Adiabatenexponent; für Luft ist $\approx \approx 1,4$

Der Bezugsschalldruck in der Pistonfonkammer hängt also nur von konstruktiven Gegebenheiten und dem atmosphärischen Luftdruck ab.

Schwingungsaufnehmer lassen sich mit Hilfe der Erdbeschleunigung absolut kalibrieren. Durch Umwenden des Aufnehmers erreicht man, daß die Erdbeschleunigung einmal von unten und einmal von oben (das heißt in positivem und in negativem Sinne) einwirkt.

Die Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern durch Messung des Schwingweges ist ebenfalls ein Absolutverfahren. Bei sinusförmiger Anregung mit bekannter Frequenz läßt sich der Schwingweg ξ über die Gleichungen (1) und (2) problemlos in die Schwinggeschwindigkeit v und die Schwingbeschleunigung a umrechnen.

4.1.2. Vergleichskalibrierung

Bei der Vergleichskalibrierung werden das zu kalibrierende Gerät und ein „Normal“ mit genau bekannten Eigenschaften dem gleichen (nicht genau bekannten, aber über den Meßzeitraum stabilen) Meßsignal ausgesetzt. Je nach Prüfobjekt findet eine der beiden folgenden Varianten Anwendung:

- Variante 1: Die Übertragungseigenschaften des Prüflings, zum Beispiel eines Schallpegelmessers, werden mit Hilfe eines veränderlichen Spannungsteilers so eingestellt, daß der Prüfling den gleichen Wert wie das Normal anzeigt.

Die Übereinstimmung gilt streng genommen nur für das angelegte Prüfsignal. Ob die Kalibrierung für den gesamten Arbeitsbereich mit hinreichender Genauigkeit gilt, hängt vom Frequenzgang des Prüflings ab und muß gegebenenfalls durch Kontrollmessungen bei anderen Frequenzen überprüft werden.

- Variante 2: Es wird von vornherein davon ausgegangen, daß der Prüfling (zum Beispiel ein Meßmikrofon) und das Normal unterschiedliche Übertragungseigenschaften (Frequenzgang) aufweisen. Die gesuchten Kennwerte für den Prüfling ergeben sich aus den Ausgangsspannungen zu

$$B_{Pr} = B_N \frac{\tilde{u}_{Pr}}{\tilde{u}_N} \quad (18a)$$

$$\text{und } G_{Pr} = G_N + 20 \cdot \lg \left(\frac{\tilde{u}_{Pr}}{\tilde{u}_N} \right) \text{ dB} \quad (18b)$$

mit

B_{Pr}, B_N = Übertragungsfaktor des Prüflings und des Normal

G_{Pr}, G_N = Übertragungsmaß des Prüflings und des Normal

u_{Pr}, u_N = Ausgangsspannung des Prüflings und des Normal bei Einwirkung des gleichen Meßsignals

Um den vollständigen Frequenzgang des Übertragungsfaktors oder -maßes zu erhalten, ist es erforderlich, die Messung nacheinander bei verschiedenen (ausreichend eng gestaffelten) Meßfrequenzen durchzuführen. Möglich ist auch eine gleitende Durchstimmung der Meßfrequenz mit analoger Aufzeichnung der Ausgangsspannung durch einen Pegelschreiber.

Die Genauigkeit der Vergleichskalibrierung wird im wesentlichen durch die Genauigkeit des Normal, die Störung der Meßgröße durch die Geräte und durch Anpassungsprobleme bestimmt. Um die Fehler gering zu halten, sind in der Praxis die folgenden Abarten des Vergleichsverfahrens in Gebrauch:

- Parallelverfahren: Beide Wandler (Prüfling und Normal) werden gleichzeitig dem gleichen Prüfsignal ausgesetzt. Besonders bei akustischen Messungen ist zu beachten, daß sich hierbei die Wandler gegenseitig beeinflussen (Verzerrung des Schallfeldes), so daß die angestrebte Art der Signaleinwirkung (zum Beispiel frontaler Einfall ebener Schallwellen im „freien Schallfeld“) nicht mehr fehlerfrei gegeben ist. Besonders kritisch sind die Verhältnisse bei unterschiedlich großen Objekten (zum Beispiel Prüfling Schallpegelmesser — Normal Meßmikrofon), da man dann nicht mehr annehmen kann, daß sich die Schallfeldstörung auf Prüfling und Normal in gleichem Sinne und mit etwa gleicher Größe auswirkt.
- Substitutionsverfahren: Beide Wandler (Prüfling und Normal) werden nacheinander dem gleichen Prüfsignal ausgesetzt.

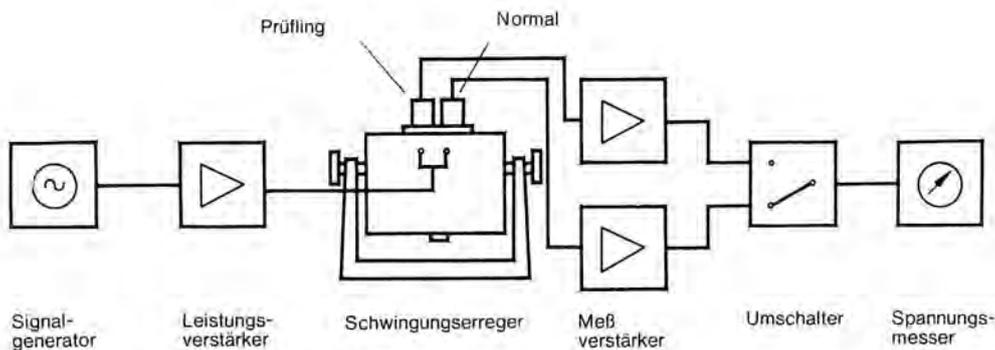


Bild 19: Blockschaltbild einer Anordnung zur Vergleichskalibrierung von Schwingungsaufnehmern nach dem Parallelverfahren

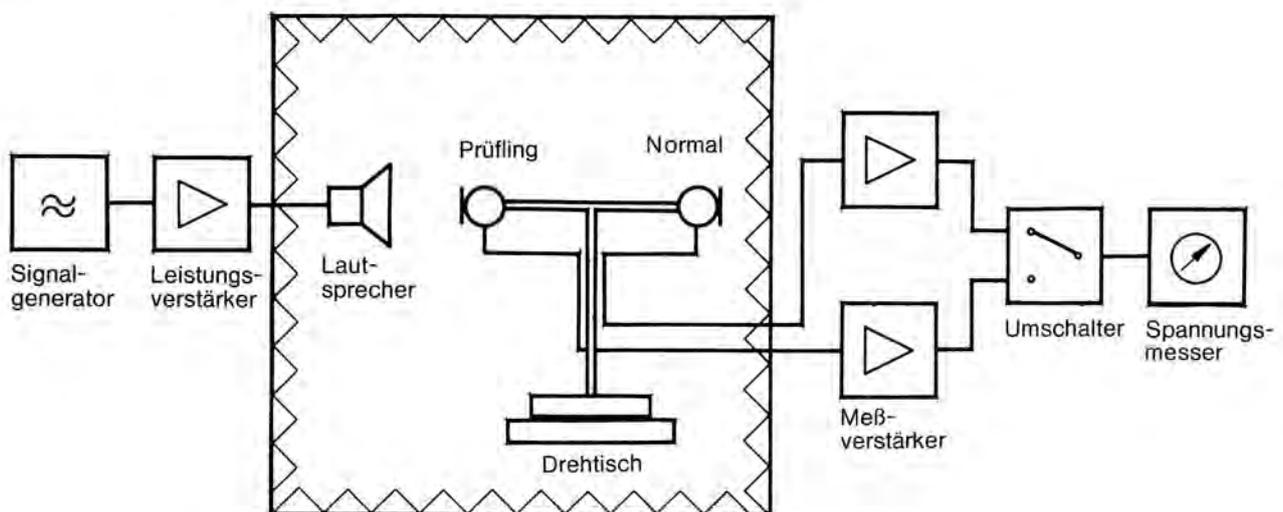
Die Einhaltung einer definierten Einwirkungsart des Prüfsignals (zum Beispiel freies Schallfeld ebener Schallwellen) ist hierbei recht gut möglich. Als Fehlerursachen sind die zeitliche Instabilität des Prüfsignals und die Unsicherheit der aufeinanderfolgenden Positionierung von Prüfling und Normal genau am gleichen Meßort zu beachten.

Das Parallelverfahren findet häufig bei der Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern Anwendung, wobei der Prüfling und das Normal neben- oder übereinander auf der Koppel­fläche des Schwingungserregers angeordnet werden. In Bild 19 ist ein vereinfachtes Blockschaltbild der Meßanordnung dargestellt. Für die Mikrofonkalibrierung ist dagegen die

Substitutionskalibrierung allgemein eingeführt. Wie Bild 20 schematisch zeigt, kann das aufeinanderfolgende Einschwenken der Mikrofone genau an den gleichen Prüflort mit Hilfe eines Drehtisches 02 012 vorgenommen werden, wobei der Drehtisch mit geeigneten Halterungen zur festen und ausreichend weit voneinander entfernten Anbringung beider Mikrofone versehen sein muß.

Genau genommen ist auch die Kalibrierung von Meßeinrichtungen mit Hilfe industriell hergestellter Pistonfone und Kalibratoren als indirekte Vergleichsmessung anzusehen, da der in der Gerätedokumentation angegebene Kalibrierwert (Schalldruckpegel, Beschleunigung usw.) im Prüffeld des Herstellers durch Vergleich mit einem Normal ermittelt wird.

Bild 20: Blockschaltbild einer Anordnung zur Vergleichskalibrierung von Meßmikrofonen und Schallpegelmessern nach dem Substitutionsverfahren



4.1.3. Reziprozitätsverfahren

Grundlage dieses recht genauen, aber etwas aufwendigen Absolutverfahrens ist das sogenannte „Reziprozitätsgesetz“ (Gesetz der wechselseitigen Leistungen). Für die Anwendung zu Kalibrierzwecken benötigt man

- eine Signalquelle S (Lautsprecher, Pistonfonkolben, Schwingungserreger),
- einen umkehrbaren Wandler W_R , der als Sender und als Empfänger betrieben werden kann (Kondensatormikrofonkapsel, elektrodynamischer Schwingungserreger usw.) und
- einen Wandler W_M , der nur als Empfänger betrieben wird.

Die Übertragungsfaktoren dieser Geräte brauchen nicht bekannt zu sein. Die Messung ergibt die Übertragungsfaktoren der beiden Wandler W_R und W_M .

Bei jeder Meßfrequenz sind zwei Kalibrierschritte auszuführen:

- 1. Schritt: Die Signalquelle erzeugt am Meßort (Pistonfonkammer, Punkt im reflexionsfreien Raum, Koppelfläche des Schwingungserregers) ein Prüfsignal. Die Wandler W_R und W_M , die nacheinander oder gleichzeitig an den Meßort gebracht werden (Einschränkungen siehe Abschnitt 4.1.2., Parallelverfahren!), liefern die Ausgangsspannungen u_{R1} und u_{M1} , wobei für die weitere Rechnung nur das Verhältnis beider interessiert.
- 2. Schritt: Der umkehrbare Wandler W_R wird unter Einspeisen des Wechselstromes i_{R2} bei der gleichen Meßfrequenz als Sender betrieben. Diese Anregung ruft am Wandler W_M eine Ausgangsspannung u_{M2} hervor, die gemessen wird. Letzten Endes wird für die weitere Rechnung wieder nur das Verhältnis beider Größen benötigt.

Der gesuchte Übertragungsfaktor beider Wandler beträgt für W_R (Betrieb als Aufnehmer)

$$B_R = \sqrt{\left(\frac{u_{R1}}{u_{M1}}\right) \cdot \left(\frac{u_{M2}}{i_{R2}}\right) \cdot k} \quad (19a)$$

und für W_M

$$B_M = \sqrt{\left(\frac{u_{M1}}{u_{R1}}\right) \cdot \left(\frac{u_{M2}}{i_{R2}}\right) \cdot k} \quad (19b)$$

mit $k =$ Konstante, in die die Meßplatzparameter und Materialkonstanten eingehen. Das Reziprozitätsverfahren läßt sich an verschiedene Meßsituationen anpassen (Mikrofonkalibrierung in der Druckkammer oder im freien Schallfeld, Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern). Entsprechend unterschiedlich ist die Konstante k ; sie beträgt zum Beispiel bei der Mikrofonkalibrierung in der Druckkammer

$$k = \frac{\omega V_D}{\kappa P_0} \quad (20a)$$

und im freien Schallfeld

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\omega \rho} \quad (20b)$$

- mit
- $V_D =$ Druckkammervolumen
 - $\kappa =$ Adiabatenexponent ($\kappa \approx 1,4$ in Luft)
 - $P_0 =$ atmosphärischer Luftdruck
 - $\rho =$ Dichte der Luft ($\rho \approx 1,19 \text{ kg/m}^3$)
 - $r =$ Abstand Sender — Empfänger

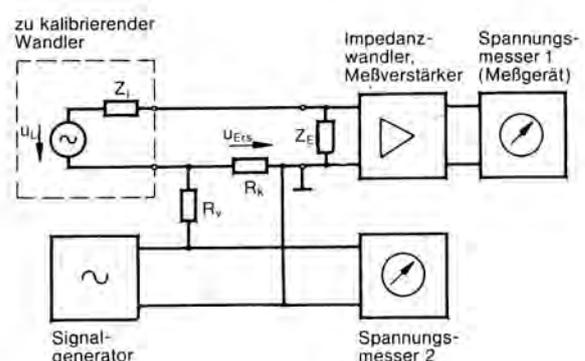
Aus Platzmangel ist es nicht möglich, die Grundlagen und Randbedingungen des Reziprozitätsverfahrens hier näher zu erläutern. Eine ausführliche Darstellung ist in der angegebenen Literatur [9], [16] zu finden.

4.1.4. Ersatzspannungsverfahren

Das Ersatzspannungsverfahren (Insert-Voltage Technique) ist keine eigenständige Kalibriermethode, sondern eine spezielle Modifikation zur Ermittlung der Leerlaufspannung des Wandlers auch unter ungünstigen Impedanzverhältnissen (hoher Innenwiderstand des Wandlers). Es läßt sich auf alle bisher vorgestellten Kalibrierverfahren anwenden.

Die Grundschaltung ist in Bild 21 angegeben. In die Masseleitung des Wandlers ist ein gegenüber der inneren Impedanz Z_i sehr kleiner Kalibrierwiderstand R_K eingefügt, der es gestattet, eine definierte Spannung u_{Ers} mit der gleichen Frequenz wie das akustische oder mechanische Prüfsignal zu der vom Wandler abgegebenen Spannung u_L in Reihe zu

Bild 21: Grundschaltung einer Kalibrieranordnung nach dem Ersatzspannungsverfahren



schalten. Wegen der kleinen vorkommenden Spannungswerte wird häufig eine größere, gut meßbare Ersatzspannung erzeugt und über einen Vorwiderstand $R_V \gg R_K$ definiert herabgeteilt.

Bei der Kalibrierung läßt man zunächst nur das Prüfsignal (Schall, mechanische Schwingung) auf den Wandler einwirken und notiert den vom Spannungsmesser 1 angezeigten Wert. Danach stellt man bei abgeschalteter Prüferregung, aber sonst unveränderter Meßanordnung die Ersatzspannung so ein, daß am Spannungsmesser 1 der gleiche Anzeigewert wie beim ersten Schritt vorliegt. In diesem Fall ist die Ersatzspannung u_{Ers} gleich der gesuchten Leerlaufspannung u_L des Wandlers.

Der Vorteil des Ersatzspannungsverfahrens gegenüber der direkten Messung der Wandlerausgangsspannung besteht darin, daß man auf einfache Weise die Leerlauf-Ausgangsspannung des Wandlers ermitteln kann, ohne die unvermeidliche Spannungsteilung zwischen der inneren Impedanz Z_i und der äußeren Impedanz Z_E (Kabelkapazität, Eingangswiderstand des Meßgerätes) kennen und berücksichtigen zu müssen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß der Wandler nur über den Widerstand R_K mit Masse verbunden ist und keinen undefinierten Masseschluß aufweist, der die Ersatzspannung kurzschließt.

4.1.5. Eichgitterverfahren

Das Eichgitterverfahren, das besonders bei Kondensatormikrofonen häufig Anwendung findet, nimmt eine Zwischenstellung zwischen der akustischen Absolutkalibrierung und der elektrischen Kalibrierung ein. Sein Grundprinzip besteht in der elektrostatischen Erzeugung einer Wechselkraft, die auf die Mikrofonmembran einwirkt und einen Schalldruck vortäuscht.

Die Erzeugung der Wechselkraft erfolgt mit Hilfe eines isolierten Metallgitters, des „Eichgitters“, das vor der elektrisch leitenden Mikrofonmembran angeordnet und mit einer Spannungsquelle verbunden ist. Bei entsprechender Auslegung kann unter Umständen das (isoliert angebrachte) normale Schutzgitter der Mikrofonkapsel die Funktion des Eichgitters mit übernehmen (Mikrofonkapseln MK 102 und MK 201 vom VEB Mikrofontechnik Gefell).

Unter der Annahme eines homogenen elektrischen Feldes zwischen Membran und Eichelektrode berechnet sich die auf die Membran wirkende Kraft zu

$$F_M = \frac{\epsilon_0 A U_E^2}{2 d^2} \quad (21)$$

- mit A = Membranfläche
 d = Abstand zwischen Eichgitter und Membran
 U_E = Spannung zwischen Eichgitter und Membran
 ϵ_0 = $8,86 \cdot 10^{-12}$ As/Vm Dielektrizitätskonstante der Luft

Zwischen der angelegten Spannung und der Kraft besteht demzufolge ein quadratischer Zusammenhang. Es gibt zwei Möglichkeiten, um eine weitgehend unverzerrte sinusförmige Anregung mit einer definierten Frequenz zu erreichen:

- Anlegen einer hohen Wechselspannung $U_E = \hat{u} \sin \omega t$. Durch die Quadrierung entstehen eine Gleichkraft und eine (vom Prinzip her unverzerrte) Wechselkraft der doppelten Anregungsfrequenz:

$$F_M = \frac{\epsilon_0 A \hat{u}^2}{4 d^2} (1 - \sin 2 \omega t) \quad (22)$$

- Überlagerung der anregenden Wechselspannung $\hat{u} \sin \omega t$ mit einer hohen Polarisationsgleichspannung $U_0 \gg \hat{u}$.

Nach der Beziehung

$$F_M = \frac{\epsilon_0 A}{2 d^2} \left[U_0^2 + \frac{\hat{u}^2}{2} + U_0 \hat{u} \sin \omega t - \frac{\hat{u}^2}{2} \sin 2 \omega t \right] \quad (23)$$

entstehen eine Gleichkraft und eine leicht verzerrte Wechselkraft, wobei der verfahrensbedingte quadratische Klirrkoeffizient

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + 4 \frac{U_0^2}{\hat{u}^2}}} \approx \frac{\hat{u}}{4 U_0} \quad (24)$$

beträgt.

Theoretisch ist es möglich, über die einwirkende Kraft den simulierten Schalldruck zu berechnen und das Verfahren zur Absolutkalibrierung heranzuziehen. Die praktischen Schwierigkeiten bei der Ermittlung des Abstandes d (unter der Wirkung des Gleichanteils!) und bei der Berücksichtigung der Feldverzerrungen sind jedoch sehr groß und führen zu erheblichen Meßfehlern. Deshalb werden für die absolute Bestimmung des Betrages des Übertragungsfaktors bei einer Bezugsfrequenz durchweg andere Verfahren verwendet.

Da die elektrostatische Anregung nicht von der Frequenz abhängt, ist das Eichgitterverfahren jedoch hervorragend für die Ermittlung des relativen Frequenzgangs des Mikrofonübertragungsfaktors geeignet. Das Verfahren ist einfach in der Handhabung und erfordert keine Spezialräume. Da der Einfluß des Druckstaus und der Richteigenschaften hierbei keine Berücksichtigung findet, entspricht der ermittelte Frequenzgang etwa dem des Druckübertragungsfaktors. In Kombination mit anderen Verfahren (Absolutmessung bei einer Frequenz mit dem Pistonfon, rechnerische Berücksichtigung der für einen Mikrofontyp konstanten Druckstaukorrektur) läßt sich mit Hilfe des Eichgitterverfahrens die Prüfung von Kondensatormikrofonen sehr rationell durchführen.

4.2. Elektrische Kalibrierung

Das Grundmerkmal der elektrischen Kalibrierung besteht darin, daß der Übertragungsfaktor der Meßkette (ohne Wandler) mit elektrischen Mitteln überprüft und auf einen (vom Wandler abhängigen) Sollwert eingestellt wird. Die elektrische Kalibrierung erfordert nur einen geringen gerätetechnischen Aufwand und läßt sich auch unter Betriebsbedingungen unmittelbar am Meßort sehr einfach ausführen. Die Verläßlichkeit des Kalibrierergebnisses steht und fällt jedoch mit der Stabilität der Übertragungseigenschaften des Wandlers, der in den Kalibrierprozeß nicht einbezogen ist. Aus diesem Grunde ist im Zweifelsfall immer der akustischen oder mechanischen Kalibrierung der Vorzug zu geben.

4.2.1. Simulation eines akustischen oder mechanischen Prüfsignals durch eine Kalibrierspannung

Das Grundprinzip der elektrischen Kalibrierung nach dem Simulationsverfahren ist in Bild 22 dargestellt. Anstelle des Wandlers wird über den Schalter S eine hochstabile Spannungsquelle an den Eingang der Meßkette angeschlossen. Die Kalibrierspannung u_{∇} täuscht eine Meßgröße M_{∇} vor, wobei gilt:

$$M_{\nabla} = \frac{u_{\nabla}}{B} \quad (25)$$

mit $B =$ Übertragungsfaktor des Wandlers. Je nach Art des Wandlers und Dimension des Übertragungsfaktors kann es sich bei der simulierten Meßgröße M_{∇} um den Schalldruck p oder eine Schwingungskenngröße (zum Beispiel die Schwingbeschleunigung a) handeln. Häufig wird die simulierte Meßgröße auch in logarithmischem Maßstab als „Kalibrierpegel L_{∇} “ angegeben. Aus Gleichung (25) folgt, daß die Kalibrierspannung u_{∇} unterschiedliche Meßgrößen M_{∇} simuliert, wenn Wandler mit unterschiedlichem Übertragungsfaktor an die Meßkette angeschlossen werden. Verwendet man zum Beispiel abwechselnd Einzell- und Halbzoll-Kondensä-

tor- und Membranmikrofone an einem Schallpegelmeßgerät, dann ist zu beachten, daß die gleiche Kalibrierspannung in beiden Fällen ganz unterschiedlichen Schalldruckpegeln zuzuordnen ist.

Die Genauigkeit der elektrischen Kalibrierung nach dem Simulationsverfahren hängt vom Fehler der Kalibrierspannung und der Unsicherheit des Übertragungsfaktors ab. Der zweite Fehlerbeitrag überwiegt in der Regel und ist die Ursache dafür, daß die elektrische Kalibrierung gegenüber der akustischen oder mechanischen eine geringere Genauigkeit zuläßt. Bei üblichen Geräten und Anordnungen beträgt die Unsicherheit der Kalibrierung etwa 0,5 bis 1 dB. Besonders über sehr lange Zeiträume und nach extremer Beanspruchung ist jedoch eine unkontrollierte Änderung der Wandlereigenschaften nicht ganz auszuschließen, so daß bei ständiger ausschließlicher Anwendung der elektrischen Kalibrierung noch erheblich größere Fehler entstehen können.

In den Schall- und Schwingungsmeßgeräten des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden beträgt der Effektivwert der Kalibrierspannung $\tilde{u}_{\nabla} = 100$ mV. Die Übertragungseigenschaften der Wandler werden vom Hersteller mit großer Sorgfalt ermittelt und in den mitgelieferten Prüfprotokollen ausgewiesen. Hinsichtlich der angewendeten Schaltungstechnik sind zwei Realisierungsarten üblich:

- Die Kalibrierspannungsquelle wird anstelle des Wandlers an den Eingang der Meßkette geschaltet, wie es im Bild 22 dargestellt ist. Diese Variante ist technisch unkompliziert und läßt zu, daß der Wandler einseitig auf Massepotential liegt.
- Die Kalibrierspannung wird über einen kleinen Widerstand eingespeist, der im Meßkreis in Reihe mit dem Aufnehmer liegt. Das Grundprinzip dieser bei den Schwingungsmeßgeräten der SM-Reihe realisierten Variante ist in Bild 23 dargestellt. Wie ein Vergleich mit Bild 21 zeigt, handelt es sich hier um eine spezielle Abart des im Ab-

Bild 22: Grundschialtung zur elektrischen Kalibrierung einer Meßkette unter Simulation eines akustischen oder mechanischen Prüfsignals durch eine Kalibrierspannung

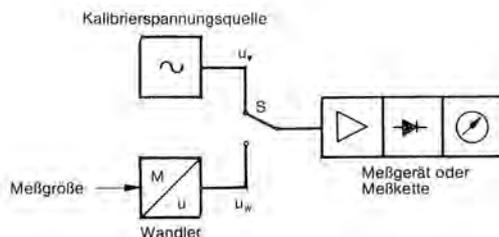
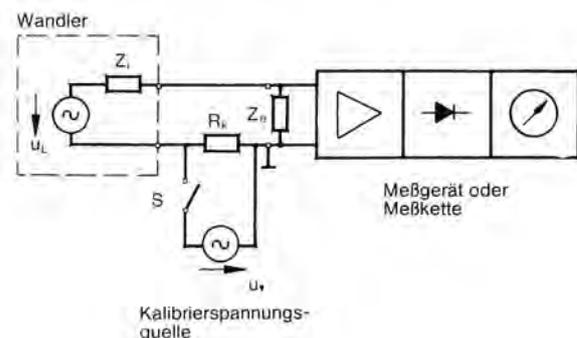


Bild 23: Variierte Grundschialtung zur elektrischen Kalibrierung einer Meßkette mit Einspeisung der Kalibrierspannung in Reihe mit dem Wandler



schnitt 4.1.4. beschriebenen „Ersatzspannungsverfahrens“.

Da der Wandler als Vorwiderstand wirkt, wird die Spannungsteilung zwischen der inneren Impedanz Z_i und der wirksamen Lastimpedanz Z_L (Kabelkapazität, Eingangswiderstand des Meßgerätes) automatisch erfaßt, so daß für B der Leerlaufübertragungsfaktor in Gleichung (25) einzusetzen ist. Wichtig ist wieder die erforderliche definierte Masseverbindung des Wandlers über den Widerstand R_K , der nicht durch einen parasitären Masse-schluß überbrückt werden darf.

In bedienungstechnischer Hinsicht gibt es ebenfalls zwei unterschiedliche Realisierungsarten:

- Variante 1: Der Kalibrierschalter S in den Bildern 22 und 23 ist unabhängig vom Pegelbereichsschalter. Die durch die Kalibrierspannung simulierte Meßgröße gemäß Gleichung (25) wird in linearem oder im Pegelmaßstab zahlenwertichtig angezeigt.
- Variante 2: Der Kalibrierschalter S ist mit dem Meßbereichsschalter kombiniert. Der Betriebsart „Kalibrierung“ ist ein bestimmter Übertragungsfaktor (Verstärkung) des Meßgerätes fest zugeordnet.

Um die Ausführung der Kalibrierung zu erleichtern, gibt der Gerätehersteller eine Gerätekonstante L_G an, aus der sich der einzustellende Kalibrierwert nach der einfachen Beziehung

$$L = L_G - a_K \quad (26)$$

mit a_K = Betriebsübertragungsmaß des Wandlers nach Gleichung (11b)

berechnen läßt. Mit den Konstanten $u_{\nabla} = 100 \text{ mV}$, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ und $B_{EO} = 10 \text{ mV/Pa}$ beträgt L_G bei Schallpegelmeßgeräten, die nach Variante 1 realisiert sind (Kalibrierschalter S und Pegelbereichsschalter getrennt), immer

$$L_G = 20 \lg \left(\frac{u_{\nabla}}{B_{EO} p_0} \right) \text{ dB} = 114 \text{ dB}$$

Für Schallpegelmeßgeräte mit elektrischer Kalibrierung nach Variante 2 ergibt sich ein abweichender Wert, da zusätzlich das Weiterschalten des Pegelbereichsschalters bis zur Kalibrierstellung und das in der Kalibrierstellung tatsächlich realisierte Übertragungsmaß des Verstärkers zu berücksichtigen sind. So beträgt die Gerätekonstante für die Präzisions-Impulsschallpegelmesser der Typen 00 017 und 00 023 $L_G = 162 \text{ dB}$.

Ein Beispiel soll die bedienungstechnischen Besonderheiten erläutern. Es sei angenommen, daß eine Mikrofoneinheit mit der Kapsel MK 102 und dem Vorverstärker MV 102 einmal an den Echtzeitanalysator 01 012 (elektrische Kalibrierung nach Variante 1) und ein andermal an einen Präzisions-Impulsschallpegelmesser 00 017 (Variante 2) angeschlossen

wird. Der aus dem Prüfprotokoll abzulesende Übertragungsfaktor soll

$$B_K = 50 \frac{\text{mV}}{\text{Pa}}$$

betragen; das entspricht einem Übertragungsmaß von $a_K = 14 \text{ dB}$.

Durch die Kalibrierspannung $u_{\nabla} = 100 \text{ mV}$ wird ein Schalldruck von

$$p_{\nabla} = \frac{u_{\nabla}}{B_K} = \frac{100 \text{ mV}}{50 \text{ mV/Pa}} = 2 \text{ Pa}$$

simuliert; das entspricht einem Schalldruckpegel von

$$L_{\nabla} = 20 \lg \frac{p_{\nabla}}{p_0} \text{ dB} = 20 \lg \left(\frac{2 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} \right) \text{ dB}$$

$$L_{\nabla} = 100 \text{ dB}$$

Beim Echtzeitanalysator 01 012 ist dieser Wert unmittelbar der einzustellende Kalibrierpegel. Zum gleichen Ergebnis kommt man durch Einsetzen der Werte $L_G = 114 \text{ dB}$ und $a_K = 14 \text{ dB}$ in Gleichung (26). Die Anzeige des Kalibrierpegels $L_{\nabla} = 100 \text{ dB}$ ist unabhängig von der Stellung des Meßbereichsschalters, solange der Meßbereich den Kalibrierpegel einschließt (40...100 dB, 50...110 dB, 60...120 dB usw.). Die höchste Kalibriergenauigkeit ergibt sich jedoch dann, wenn der einzustellende Pegelwert am oberen Ende des Meßbereichs liegt.

Anders ist die Situation beim Präzisions-Impulsschallpegelmesser 00 017, bei dem der Kalibrierschalter S mit dem Pegelbereichsschalter zusammengelegt ist (Variante 2). Die Kalibrierstellung schließt sich hier an den höchsten Pegelbereich an; außerdem stimmt das dabei wirksame Übertragungsmaß des Verstärkers mit keinem der Meßbereiche überein. Mit der vom Gerätehersteller angegebenen Gerätekonstante $L_G = 162 \text{ dB}$ ergibt sich im vorliegenden Fall ein Kalibrierpegel von $L_{\nabla} = 148 \text{ dB}$, der wie folgt einzustellen ist:

- Einschalten der Betriebsart „Kalibrieren“ (alle Schalter in Stellung ∇)
- Verstelleischiebe am Pegelbereichsschalter so einstellen, daß der Kalibrierstellung ein fiktiver Meßbereich von 140 dB zugeordnet ist
- Herbeiführen eines Zeigerausschlags von $+8 \text{ dB}$ am Anzeigeelement durch Verstellen des Kalibrierfeinreglers

Die Kalibrierung gilt, wie bereits erwähnt, nur für den Wandler, dessen Kennwerte bei der Berechnung des Kalibrierpegels eingesetzt wurden. Bei Verwendung von Mikrofonen oder Aufnehmern mit anderen Übertragungseigenschaften ist die Meßkette unter Berücksichtigung der veränderten Kalibriergröße M_{∇} oder L_{∇} neu zu kalibrieren.

Bei älteren Schallpegelmessern (PSI 201/202) war es üblich, die Mikrofonempfindlichkeit durch einen sogenannten K-Wert auszudrücken, wobei gilt:

$$K = a_K - \begin{cases} 6 \text{ dB für Geräte mit Mikrofonkapsel MK 101} \\ 12 \text{ dB für Geräte mit Mikrofonkapsel MK 102} \end{cases}$$

Das Anzeigeinstrument trug eine getrennte Kalibrierskala, auf der für das jeweilige Mikrofon angegebene K-Wert einzustellen war. Auch hierbei handelt es sich um eine Abart des als „Variante 2“ bezeichneten elektrischen Kalibrierverfahrens.

4.2.2. Pfeifpunktkalibrierung

Die Pfeifpunktkalibrierung ist ein einfaches elektrisches Kalibrierverfahren, das ohne hochstabile Spannungsquelle auskommt. Wie Bild 24 zeigt, wird zwischen Eingang und Ausgang des Meßverstärkers während des Kalibriervorgangs über einen Vierpol mit definiertem und stabilem Übertragungsfaktor k eine Verbindung hergestellt. Durch Selbsterregung beginnt der Verstärker zu schwingen, sobald die Rückkopplungsbedingung

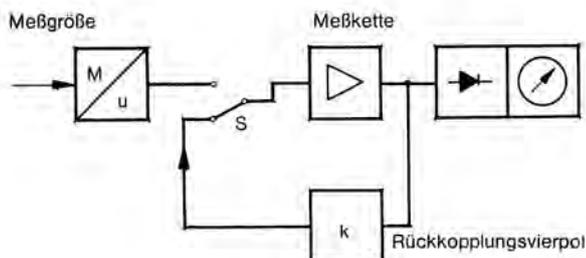
$$k \cdot v = 1 \quad (27)$$

mit $k^L =$ komplexer Übertragungsfaktor des Vierpols
 $v^L =$ komplexer Übertragungsfaktor des Verstärkers

betrags- und phasengerecht erfüllt ist.

Der Einsatzpunkt selbsterregter Schwingungen eignet sich damit zur genauen Einstellung eines bestimmten Übertragungsfaktors des Verstärkers. Die Anzeigeeinrichtung wirkt hierbei nur als Indikator dafür, ob Selbsterregung vorliegt oder nicht. In der Regel gibt es bei der Kalibrierung nur die

Bild 24: Grundschialtung zur Kalibrierung nach dem Pfeifpunktverfahren



beiden Anzeigezustände „Zeiger am unteren Bereichsende“ (keine Selbsterregung) oder „Zeiger am Endausschlag“ (Selbsterregung liegt vor). Mit Geduld lassen sich gegebenenfalls auch Zwischenwerte einstellen, die jedoch nicht stabil sind.

Die Pfeifpunktkalibrierung hat folgende Nachteile:

- Die Kalibrierung erfaßt nur den Verstärker, Wandler, Gleichrichter und Anzeigeinstrument bleiben unberücksichtigt; Veränderungen ihrer Eigenschaften sind nicht zu erkennen.
- Es entsteht kein definiertes Kalibriersignal. Deshalb ist es nicht möglich, erweiterte Meßketten (Schallpegelmesser mit angeschlossenen meßwertverarbeitenden Geräten) auf diesem Wege zu kalibrieren.
- Bei der Bedienung stört, daß der Zeiger mit einsetzender Selbsterregung plötzlich hart an den Endausschlag geschleudert wird.

Die genannten Nachteile sind der Grund, weshalb die Pfeifpunktkalibrierung trotz ihrer einfachen Realisierbarkeit in den modernen Schall- und Schwingungsmeßgeräten des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden nicht mehr zu Anwendung kommt.

4.3. Kalibrierung von Meßketten und Meßplätzen

Die bisher gegebenen Erläuterungen zur akustisch-mechanischen und zur elektrischen Kalibrierung gelten für Meßeinrichtungen aller Art. Bei komplexen Meßketten und Meßplätzen, die sich aus einzelnen, getrennt einstellbaren Geräten und Einschüben zusammensetzen, ist es jedoch erforderlich, einige zusätzliche Hinweise zu beachten, um bei der Kalibrierung die Übersicht wahren und Fehlbedienungen vermeiden zu können.

Nach dem Einschalten der Geräte ist zunächst die vom Hersteller angegebene Einlaufzeit abzuwarten, bevor man mit der Kalibrierung beginnt. Bei längeren Meßreihen ist die Kalibrierung in bestimmten, von der Stabilität der Gesamtanlage abhängigen Zeitabständen zu wiederholen. Unbedingt zu empfehlen ist auch bei kürzeren Meßreihen eine abschließende Kontrolle der Kalibrierung zum Ende der Messungen, um jedes Risiko unbemerkter Abweichungen von vornherein auszuschließen.

Zur Schaffung einer definierten Ausgangssituation sind bei der Erstkalibrierung nach dem Einschalten alle für sich funktionstüchtigen Geräte wie Pegelschreiber, Oszilloskop, Analog-Digital-Umsetzer und systemfremde Auswertegeräte entsprechend ihrer Bedienungsanleitung einzeln zu kalibrieren. Das gilt unabhängig davon, ob im Verlaufe der Gesamtkalibrierung eine nochmalige Veränderung der gefundenen Einstellung erforderlich wird oder nicht.

Anschließend ist das Kalibriersignal an den Eingang der Meßkette anzulegen oder einzuschalten. Bei umfangreichen Meßanordnungen empfiehlt sich danach eine schrittweise qualitative Kontrolle des Signalflusses. Defekte Funktionsblöcke, Fehler in der Verkabelung, Kabelbrüche, Kontaktunsicherheiten und ähnliche Erscheinungen lassen sich — falls sie auftreten — auf diesem Wege leicht eingrenzen.

Die eigentliche Kalibrierung der Gesamtmeßkette gliedert sich in zwei Teilschritte:

1. Teilschritt: Herstellen der ziffernmäßigen Übereinstimmung zwischen der Kalibriergröße und der Anzeige:

- Mit dem Meßbereichsschalter ist ein geeigneter Verstärkungs- oder Pegelbereich einzustellen, bei dem sich ein gut ablesbarer Anzeigewert des Kalibriersignals im oberen Teil des Anzeigebereichs ergibt.
- Mit dem Feinregler ▼ ist der richtige Anzeigewert einzustellen (Ziffernfolge bei linearen Größen wie Schalldruck, Beschleunigung und Spannung oder Einer- und Zehntelstelle bei Pegelgrößen).

2. Teilschritt: Herstellen der richtigen Zuordnung zum Meßbereich (Zehnerpotenz oder Kommastelle bei linearen Größen, Dekade bei Pegelgrößen)

Hierzu dienen die an den Meßverstärkern vorhandenen verstellbaren Zahlenscheiben, die mit dem internen elektrischen Meßbereichswähler über eine Rastung verkoppelt sind. In einem Fensterausschnitt auf der Frontplatte des Meßverstärkers ist eine Zahl sichtbar, die bei linearen Größen dem Skalenendwert und bei Pegeln dem zur Anzeige zu addierenden Zehnerwert entspricht. Da Meßbereichswähler meist in 10-dB-Schritten gestuft sind, ergeben sich üblicherweise Zahlenwerte der Reihe

... 0,32 ... 1 ... 3,2 ... 10 ... bei linearen Größen und
... 10 ... 20 ... 30 ... 40 dB bei Pegeln.

Geräte mit digitaler Meßwertausgabe, zum Beispiel der Analog-Digital-Umsetzer 52 003 oder die Digitalanzeige des Echtzeitanalysators 01012, besitzen eine Einrichtung zur Addition von $n \cdot 10$ dB zum Pegelmeßwert. Dieses mit „Digitaler Referenzpegel“ bezeichnete Bedienelement übernimmt die Rolle der Verstellungscheibe und ermöglicht die auch in der Zehner- und Hunderterstelle zahlenwertrichtige digitale Darstellung der Meßwerte.

Zu beachten ist, daß die Meßbereichsumschaltung nicht bei allen Geräten mit der Umschaltung des digitalen Referenzpegels verkoppelt ist (Meßplätze mit dem ADU 52 003!). Bei Bereichswechsel muß dann der digitale Referenzpegel ebenfalls umgeschaltet werden, damit die zahlenwertrichtige Zuordnung erhalten bleibt.

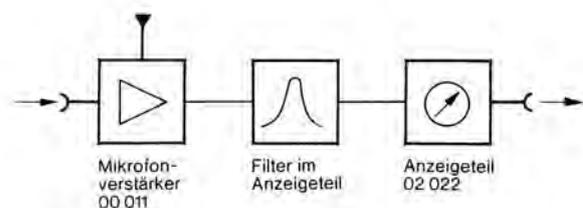
Das konkrete Vorgehen bei der Kalibrierung hängt davon ab, welche Geräte und Einschübe eine Kalibrier- oder Einstellmöglichkeit besitzen und welche Verzweigungen im Signalfluß vorgesehen sind. Ein Meßplatz läßt sich nur dann vollständig kalibrieren, wenn in jedem Signalpfad mindestens

eine unabhängige Einstellmöglichkeit vorhanden ist, weil jeder Signalweg für sich kalibriert werden muß.

Die folgenden Beispiele erfassen praktisch sämtliche vorkommenden Grundtypen von Meßplätzen. Das Symbol ▼ kennzeichnet das Vorhandensein einer Einstellmöglichkeit am betrachteten Funktionsblock; die Pfeile geben die Richtung des Signalflusses an. Für die Erläuterung ist es ohne Belang, ob das Kalibriersignal akustisch, mechanisch oder elektrisch erzeugt wird.

Beispiel 1 (Bild 25): Im einfachsten Fall weist die Meßkette keine Verzweigungen auf und besitzt nur eine Einstellmöglichkeit für die Kalibrierung. Der Kalibriervorgang besteht darin, daß mit dem Einstellregler bei anliegendem Kalibriersignal Übereinstimmung zwischen der Anzeige und der Kalibriergröße hergestellt wird.

Bild 25: Meßkette ohne Verzweigung mit nur einer Kalibriermöglichkeit (Beispiel 1)



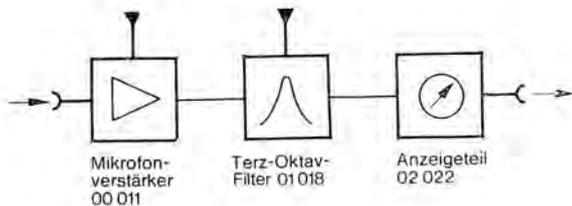


Bild 26: Meßkette ohne Verzweigung mit zwei unabhängigen Kalibriermöglichkeiten (Beispiel 2)

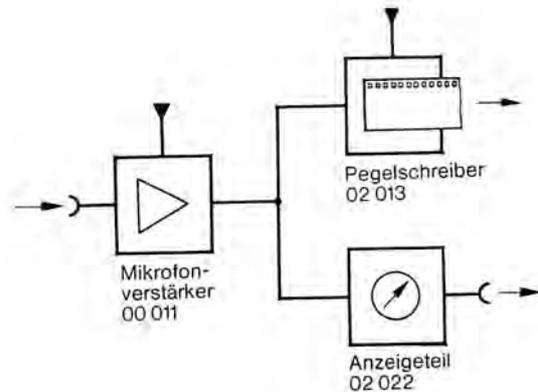


Bild 28: Meßkette mit paralleler Bereitstellung der Meßwerte durch zwei Ausgabegeräte (Beispiel 4)

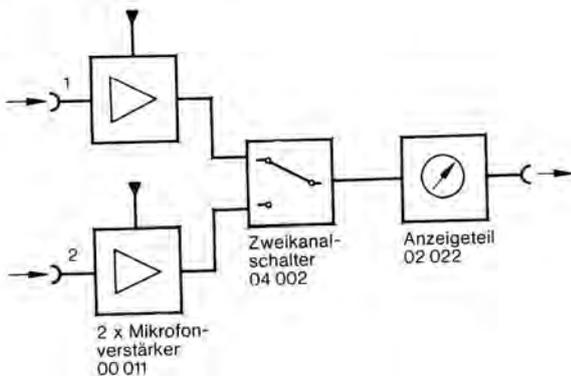


Bild 27: Meßkette mit zwei Eingangskanälen, die wechselweise an den Auswerteteil angeschlossen werden (Beispiel 3)

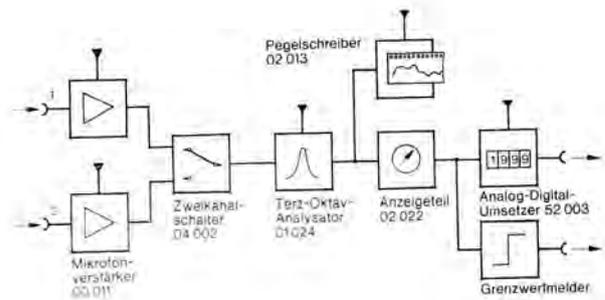


Bild 29: Komplexer Meßplatz mit mehreren Signalverzweigungen und Kalibriermöglichkeiten (Beispiel 5)

Beispiel 2 (Bild 26): Es kommt häufig vor, daß eine nicht verzweigte Meßkette zwei oder mehr Kalibriermöglichkeiten besitzt, die zunächst prinzipiell als gleichrangig anzusehen sind.

Tatsächlich beeinflussen sie jedoch die Aussteuerungsverhältnisse innerhalb der Meßkette in unterschiedlicher Weise.

Deshalb muß sich die Auswahl des zu betätigenden Kalibrierreglers danach richten, auf welche Weise optimale Aussteuerungsbedingungen (einerseits hoher Abstand Nutz-Störsignal, andererseits Sicherheit gegen Übersteuerung) gewährleistet werden können.

Im vorliegenden Fall dient der Kalibriereinsteller des Terz-Oktav-Analysators zur Anpassung des Eingangsspannungsbedarfs an die Ausgangsspannung des Mikrofonverstärkers.

Zur Gesamtkalibrierung der Meßkette darf deshalb ausschließlich der Kalibriereinsteller des Mikrofonverstärkers verwendet werden.

Beispiel 3 (Bild 27): Zwei (oder mehr) Eingangskanäle mit getrennten Kalibriermöglichkeiten werden nacheinander an den Auswerteteil der Meßkette angeschlossen.

Grundsätzlich ist jeder Signalweg für sich zu kalibrieren. Dabei muß genau wie bei der eigentlichen Messung gewährleistet sein, daß die abgeschalteten Kanäle den durchgeschalteten nicht beeinflussen (zum Beispiel durch Übersprechen).

Beispiel 4 (Bild 28): Der ankommende Signalfluß wird aufgezweigt und an zwei (oder mehr) Stellen angezeigt oder ausgewertet.

Entsprechend den verfügbaren Einstellmöglichkeiten erfolgt die Kalibrierung der beiden Kanäle in den Schritten

- Kalibrierung des Signalweges Mikrofonverstärker — Anzeigeteil am Mikrofonverstärker

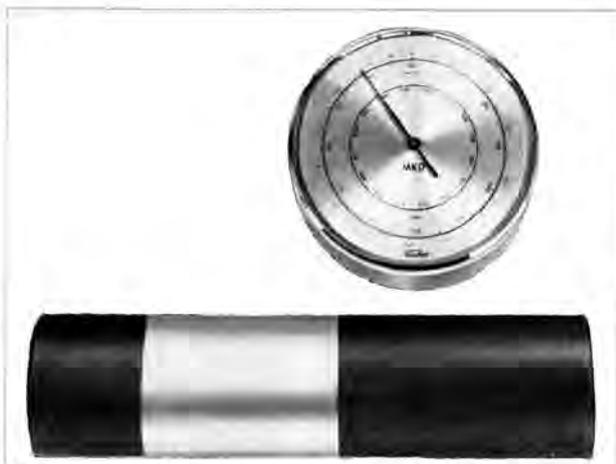
- Kalibrierung des Signalweges Mikrofonverstärker — Pegelschreiber am Pegelschreiber (ohne Veränderungen am Mikrofonverstärker!)

Beispiel 5 (Bild 29): Verzweigte Meßplätze dieser Art kommen in der Praxis durchaus nicht selten vor. Sind systemfremde Geräte beteiligt — in diesem Fall ein Grenzwertmelder —, dann kann es geschehen, daß unter Umständen die Zahl der Einstellmöglichkeiten zur vollständigen Kalibrierung aller Elemente der Meßkette nicht ausreicht. Hier lassen sich das Anzeigeteil und der Grenzwertmelder nicht unabhängig voneinander einstellen, so daß man für eines der beiden Geräte (zweckmäßig das Anzeigeteil) auf die genaue Übereinstimmung zwischen Meßwert und Anzeige verzichten muß. Es empfiehlt sich, beim Kalibriervorgang folgende Reihenfolge einzuhalten:

- Herstellen der Übereinstimmung der Anzeigen des Analog-Digital-Umsetzers und des Grenzwertmelders am ADU. Falls der Grenzwertmelder keine eigene Anzeige besitzt, ist der Schwellenpegel für die Grenzwertmeldung mit der zugehörigen Anzeige am ADU in Übereinstimmung zu bringen.
- Kalibrierung der Meßkette Mikrofonverstärker 1 — Analog-Digital-Umsetzer am Mikrofonverstärker. Durch den vorhergehenden Schritt ist die Meßkette bis zum Grenzwertmelder automatisch ebenfalls richtig eingestellt.
- Kalibrierung der Meßkette Mikrofonverstärker 1 — Pegelschreiber am Einstellregler des Pegelschreibers.
- Kalibrierung der Meßkette Mikrofonverstärker 2 — Analog-Digital-Umsetzer am Mikrofonverstärker 2.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß das Anzeigeteil im vorliegenden Beispiel innerhalb bestimmter Grenzen fehlerhafte Werte anzeigen kann, ohne daß sich das auf die Genauigkeit der Anzeige des ADU oder der Ansprechschwelle des Grenzwertmeldes auswirkt.

Bild 30: Pistonfon 00 003



5. Kalibrier- und Hilfsgeräte

Der vorliegende Abschnitt gibt eine Übersicht über industriell hergestellte Kalibrier- und Hilfsgeräte aus dem Angebot des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden.

Da sich durch den technischen Fortschritt Änderungen der Eigenschaften ergeben können, ist zu empfehlen, vor dem Kauf oder dem Einsatz von Geräten den aktuellen Stand anhand neuester Prospekte und Geräteunterlagen zu ermitteln.

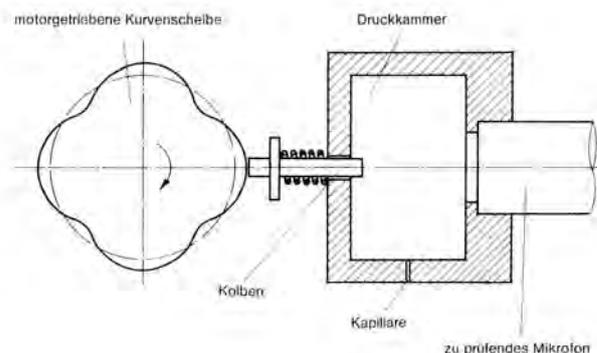
Für die Bedienung der Geräte sind im Zweifelsfall immer die Angaben der zum Erzeugnis mitgelieferten Anwenderdokumentation verbindlich.

5.1. Pistonfon 00 003

Das im Bild 30 dargestellte Pistonfon 00003 ist eine kleine, aus Batterien gespeiste Präzisionschallquelle zur schnellen und genauen Kalibrierung von Schallpegelmeßgeräten. Das angewendete Prinzip der akustischen Kalibrierung bezieht das Mikrofon einschließlich Verlängerungskabel in den Kalibrierprozeß ein. Infolge des Druckkammerprinzips wird der Druckübertragungsfaktor des Prüflings ermittelt, der bei der Meßfrequenz von etwa 180 Hz praktisch mit dem Freifeldübertragungsfaktor identisch ist.

Die Wirkungsweise ist aus der stark vereinfachten Darstellung in Bild 31 zu ersehen. Eine mit Nocken versehene Kurvenscheibe, die von einem drehzahlstabilisierten Elektromotor angetrieben wird, regt zwei durch Federn angedrückte Kolben zu einer hin- und hergehenden Bewegung an (in Bild 31 ist nur ein Kolben dargestellt). Durch die gleichsinnig wirkende Kolbenbewegung wird eine periodische Volumenänderung der Druckkammer hervorgerufen, die zu einer definierten periodischen Druckänderung der eingeschlossenen Luft führt. Dieser Wechseldruck wirkt als Kalibriergröße auf das in die Kammer hereinragende Mikrofon ein. Die Größe der Druckschwankung läßt sich aus Gleichung (17) errechnen.

Bild 31: Stark vereinfachtes Funktionsschema des Pistonfons 00 003



Zur Anpassung des inneren Gleichdrucks an den äußeren Luftdruck ist eine Druckausgleichskapillare vorgesehen. Der Druckausgleich erfolgt mit einer so großen Trägheit, daß die schnellen Druckschwankungen, die das Prüfsignal bilden, praktisch nicht beeinflußt werden.

Technische Daten:

— Erzeugter Schalldruckpegel	(118 ± 0,2) dB
— Kalibrierfrequenz	180 Hz
— Kurvenform des Meßsignals	Sinusschwingung; Klirrfaktor $k \approx 5\%$
— Druckkammervolumen	40 cm ³
— Mikrofone, die kalibriert werden können	Kondensatormikrofone und keramische Mikrofone mit den Kapseldruchmessern 1" (MK 102, KM Typ 00029) 1/2" (MK 201) 1/4" (MK 301)

Das am Schallpegelmessers SPM 101 verwendete dynamische Mikrofon ist wegen seiner konstruktiven Ausführung und des inneren Aufbaus nicht für die Pistonfonkalibrierung geeignet.

Beim praktischen Einsatz des Pistonfon ist zu beachten, daß der erzeugte Schalldruck nach Gleichung (17) vom atmosphärischen Gleichdruck der Umgebung abhängt. Aus diesem Grunde gehört zum Lieferumfang des Pistonfons ein Barometer, das außer der Druckskala eine zweite Skala mit Korrekturwerten des erzeugten Schallpegels aufweist. Der bei der Kalibrierung als Prüfgröße anzusetzende Schalldruckpegel ist gleich dem im Meßprotokoll angegebenen Pegel, korrigiert um den vom Umgebungsdruck abhängigen Wert.

Bild 33 Akustischer Kalibrator 05 000

Auch der im Bild 32 dargestellte Akustische Kalibrator 05 000 ist eine batteriebetriebene Präzisionsschallquelle zur raschen und genauen Kalibrierung von Schallpegelmeßgeräten direkt am Einsatzort. Neben den allgemeinen Vorteilen der akustischen Kalibrierung ist hier besonders die Frequenz des sinusförmigen Prüfsignals erwähnenswert, die mit 1000 Hz gerade der Bezugsfrequenz der international standardisierten Frequenzbewertungskurven A, B, C und D entspricht. Die Meßkette kann deshalb (im Gegensatz zum Pistonfon) auch mit eingeschaltetem Frequenzbewertungsfilter kalibriert werden, ohne daß Pegelkorrekturen erforderlich sind.



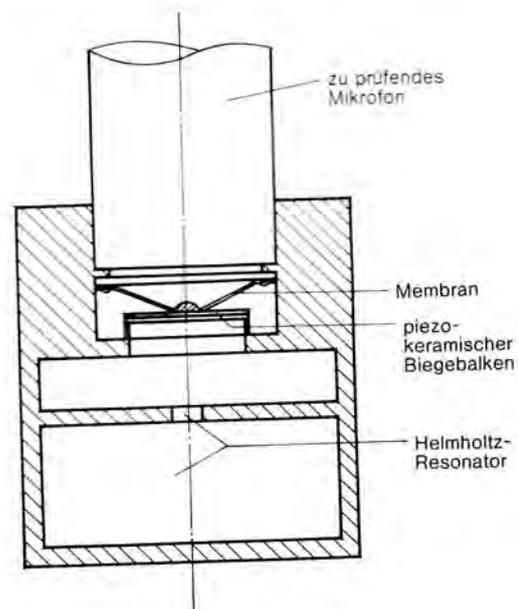
Bild 32: Akustischer Kalibrator 05 000

Der Aufbau ist aus der stark vereinfachten Darstellung in Bild 33 zu ersehen. Ein batteriebetriebener 1000-Hz-Generator (im unteren Teil des Kalibrators angeordnet) erzeugt eine Wechselfspannung, die den piezokeramischen Doppelbiegebalken in Biegeschwingungen versetzt. Die mit dem Balken verbundene Membran wird dadurch in axialer Richtung zu Schwingungen angeregt und erzeugt im oberen Teil des Kalibrators einen definierten Wechseldruck, der auf das zu kalibrierende Mikrofon als Prüfsignal einwirkt.

Das Anregungssystem ist ein schwingungsfähiges Gebilde, das bei seiner Eigenresonanzfrequenz betrieben wird. Auf das akustische Verhalten hat das die gleiche Wirkung wie eine Vergrößerung des Kammervolumens um ein Vielfaches des geometrisch vorhandenen Volumens. Ein ganz wesentlicher Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß die Größe des bei der Kalibrierung angekoppelten Mikrofonvolumens jetzt nur noch einen vernachlässigbar geringen Einfluß auf den erzeugten Schalldruck ausübt.

Da die Federwirkung des unter der Membran eingeschlossenen Luftpolsters vom statistischen Luftdruck abhängt, würde

Bild 33: Vereinfachtes Funktionsschema des Akustischen Kalibrators 05 000



sich ohne Korrekturmaßnahmen eine unerwünschte Druckabhängigkeit der Eigenfrequenz des Anregungssystems einstellen, die den erzeugten Schalldruck beeinflusst und die Kalibrierengenauigkeit herabsetzt. Als Gegenmaßnahme ist über eine Bohrung ein weiterer Hohlraum an das Luftvolumen unter der Membran angekoppelt. Bohrung und Hohlraum wirken zusammen als „Helmholtzresonator“ mit der gleichen Eigenfrequenz wie das Anregungssystem. Bei seiner Eigenfrequenz wirkt ein Helmholtzresonator wie eine sehr große Öffnung nach außen, so daß die resultierende Steifigkeit des Luftpolsters unter der Membran stark zurückgeht. Die Resonanzfrequenz des Anregungssystems hängt dann nur noch von der (druckunabhängigen) Federwirkung der Membran ab. Die Eigenfrequenz des Helmholtzresonators selbst ist vom Prinzip her unabhängig vom statischen Luftdruck.

Technische Daten:

– Erzeugter Schalldruckpegel	(94 ± 0,3) dB
– Kalibrierfrequenz	1000 Hz ± 1 ‰
– Kurvenform des Meßsignals	Sinusschwingung; Klirrfaktor $k \leq 1 ‰$
– Wirksames Kammervolumen	> 100 cm ³
– Mikrofone, die kalibriert werden können	Kondensatormikrofone und keramische Mikrofone mit den Kapseldurchmessern 1" (MK 102, KM Typ 00029) 1/2" (MK 201) 1/4" (MK 301)

Der gegenüber dem Pistonfon geringere Schalldruckpegel erfordert beim Kalibriervorgang in erhöhtem Maße die Beachtung eines ausreichenden Störabstandes zum Umgebungslärm und beim 1/4"-Mikrofon auch zum Eigenstörpegel der Meßkette.

Das am Schallpegelmessers SPM 101 verwendete dynamische Mikrofon ist wegen seiner konstruktiven Ausführung und des inneren Aufbaus nicht für die Druckkammerkalibrierung geeignet.

5.3. Kugelfall-Prüfschallquelle PSQ 101

Die nicht mehr in Produktion befindliche Kugelfallschallquelle ist eine früher häufig eingesetzte Prüfschallquelle geringer Genauigkeit. Das Gerät war in erster Linie für die akustische Kalibrierung des Schallpegelmessers SPM 101 und weiterer Mikrofone und Schallpegelmessers vorgesehen, deren Ausführung die Anwendung des Pistonfons nicht zuließ.

Während des Kalibriervorgangs fallen einige tausend Stahlkugeln aus einem Reservoir auf ein Ablenkprisma und prallen gegen eine Membran. Dadurch entsteht für die Dauer von etwa 10 s ein rauschähnliches Geräusch, dessen typisches Spektrum in Bild 34 aufgetragen ist. Der auf dem Typenschild angegebene Schalldruckpegel ergibt sich in einer bestimmten, durch einen Distanzstift vorgegebenen Entfernung vor der Membran.

Zur Rückführung der Kugeln muß die Prüfschallquelle auf den Kopf gestellt werden. Das dabei durch die Kugeln hervorgerufene Geräusch ist nicht als Prüfschall geeignet! Die Auslösung des Kalibriervorgangs erfolgt durch erneutes Umdrehen des Gerätes um 180°.

Technische Daten:

– Erzeugter Schalldruckpegel	etwa (94 ± 2) dB; genauer Wert auf Typenschild
– Meßsignal	Rauschen; Spektrum siehe Bild 34
– Mikrofone, die kalibriert werden können	alle Typen (soweit Genauigkeit ausreicht)

Infolge des statistischen Charakters des Meßsignals schwankt der Zeiger des Schallpegelmeßgerätes während der Kalibrierung. Beim Ablesen ist deshalb der Zeigerausschlag einige Sekunden lang visuell zu mitteln.

Bild 34: Oktavspektrum des von der Prüfschallquelle PSQ 101 erzeugten Prüfschalls (typischer Verlauf)



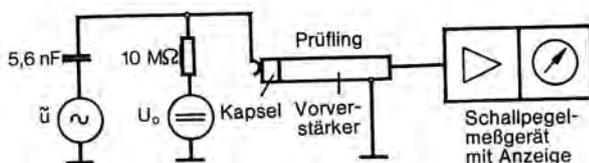
Die bereits unter normalen Bedingungen recht große Meßunsicherheit von etwa ± 2 dB erhöht sich nochmals, wenn das zu prüfende Gerät im Hauptfrequenzbereich der Kugelfallschallquelle einen unebenen Frequenzgang aufweist. Dieser Zusatzfehler läßt sich durch Berücksichtigung eines Korrekturwertes wieder ausgleichen, wie er zu jedem Schallpegelmesser SPM 101 individuell mitgeliefert wurde.

5.4 Elektrostatisches Eichgitter

Das bereits im Abschnitt 4.1.5. ausführlich vorgestellte Eichgitterverfahren eignet sich zur raschen und dabei doch recht genauen Ermittlung des relativen Frequenzgangs des Übertragungsmaßes von Kondensator-Meßmikrofonen. Der elektrostatisch gemessene Frequenzgang entspricht etwa dem Frequenzgang des Druckübertragungsfaktors, jedoch läßt sich auf diesem Wege durch rechnerische, grafische oder elektrische Korrektur der Schallfeldverzerrungen auch der Frequenzgang des Freifeldübertragungsfaktors ausreichend genau ermitteln. Um den Verlauf des Übertragungsfaktors in absoluten Einheiten angeben zu können, muß man das Mikrofon zusätzlich bei mindestens einer Frequenz nach einem anderen Verfahren in Absolutwerten kalibrieren (zum Beispiel mit Hilfe des Pistonfons 00 003 oder des Akustischen Kalibrators 05 000).

Der Meßaufbau für das Eichgitterverfahren ist in Bild 35 schematisch dargestellt. Als Eichgitter eignet sich bei den Mikrofonkapseln MK 102 und MK 201 aus dem VEB Mikrofontechnik Gefell das isoliert eingesetzte Schutzgitter an der Stirnseite, so daß die Anwendung dieses Verfahrens ohne aufwendige Zurichtungen möglich ist. Bei Mikrofonen anderer Hersteller sowie bei der Viertelzollkapsel MK 301 muß jedoch die Schutzkappe während der Kalibrierung gegen eine Einrichtung mit isoliert angeordnetem Eichgitter ausgetauscht werden. Einige Hersteller führen dazu spezielle Hilfsmittel in ihrem Lieferprogramm.

Bild 35: Schema des Meßaufbaus zur Realisierung des Eichgitterverfahrens



Wie bereits im Abschnitt 4.1.5. erwähnt, gibt es zwei Modifikationen des Verfahrens:

- Anlegen einer hohen Polarisationsgleichspannung U_0 mit überlagerter relativ kleiner Wechselspannung \tilde{u} : Die auf die Mikrofonmembran wirkende Wechselkraft folgt dem Verlauf der angelegten Wechselspannung, wobei verfahrensbedingt eine (unterschiedlich große) nichtlineare Komponente hinzutritt (siehe Gleichung (24)).
- Anlegen einer hohen sinusförmigen Wechselspannung \tilde{u} ohne überlagerte Polarisationsgleichspannung U_0 : Die auf die Mikrofonmembran wirkende Wechselkraft folgt vom Prinzip her verzerrungsfrei der doppelten Frequenz der angelegten Wechselspannung.

Technische Daten:

Die nachfolgende Tabelle enthält einige Richtwerte für die zu erwartenden äquivalenten Schallpegel. Bei der Auswahl der Spannungen sind die Hinweise des Mikrofonherstellers bezüglich der maximal zulässigen Spannungen zu beachten, um Zerstörungen des Mikrofons durch elektrische Überschlüsse zu vermeiden. Außerdem muß der Luftraum zwischen Mikrofonmembran und Eichgitter absolut frei von Fremdkörpern sein (Staub!).

Mikrofonkapsel	U_0/V	\tilde{u}/V	simulierter Schallpegel in dB
Einzollkapsel MK 102	0	100	70
	600	10	80
Halbzollkapsel MK 201	0	100	100
	100	10	80

Für die Anwendung des Eichgitterverfahrens sind keine Spezialmeßräume erforderlich. Allerdings muß der Störschall-Druckpegel am Ort der Kalibrierung ausreichend niedrig lie-

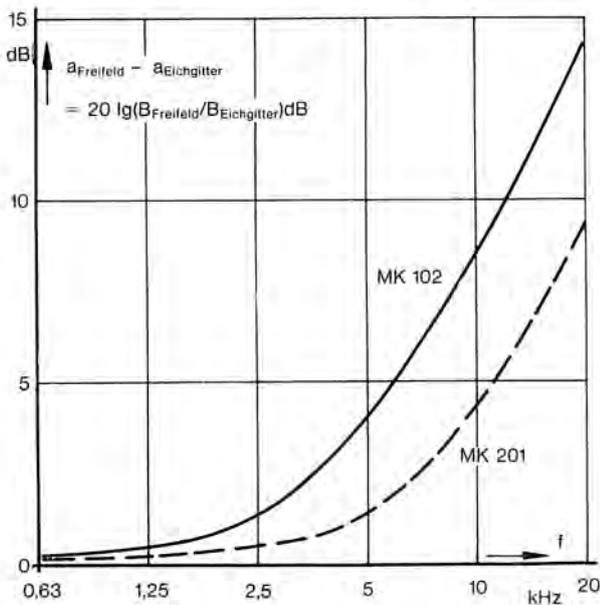


Bild 36: Differenz der Frequenzgänge des Übertragungsmaßes zwischen frontaler Beschallung im freien Schallfeld und der Messung nach dem Eichgitterverfahren für die Mikrofonkapseln MK 102 und MK 201

gen, da das Mikrofon weiterhin auf einwirkenden Luftschall anspricht.

Um die Ermittlung des Freifeldfrequenzgangs aus dem Meßergebnis mit dem Eichgitter zu erleichtern, ist in Bild 36 der Verlauf der Freifeldkorrektur für die Kapseln MK 102 und MK 201 als Funktion der Frequenz angegeben.

Bild 37: Meßkondensator K 63 als Ersatzkapazität für die Einzellkapsel MK 102



5.3 Meßkondensatoren

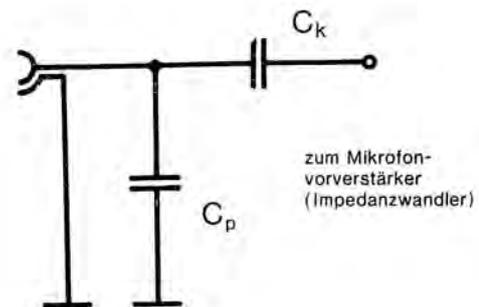
Der Meßkondensator, gelegentlich auch „Ersatzkapazität“ genannt, ist die elektrische Nachbildung einer Kondensatormikrofonkapsel, an deren Stelle sie auf den Mikrofonvorverstärker aufgeschraubt wird. Die innere Kapazität des Kondensators entspricht der typischen Kapselkapazität. Da sich diese Werte bei Kapseln unterschiedlichen Durchmessers stark unterscheiden, ist für jeden Kapseltyp ein eigener Meßkondensator erforderlich, Bild 37 zeigt den als Ersatzkapazität für die Einzellkapsel MK 102 vorgesehenen Meßkondensator K 63, Bild 38 das Prinzip der inneren Beschaltung.

Der Meßkondensator läßt sich für folgende Aufgaben einsetzen:

- Elektrische Kalibrierung einer Schallpegelmeßkette
- Überprüfung der „Arbeitsfläche“ einer kompletten Meßkette (siehe Bild 9), wobei Frequenz und Eingangsspannung in weiten Grenzen variiert werden
- Untersuchung nichtakustischer Störeinflüsse auf die Schallpegelmeßkette
- Erweiterung des Schallpegelmeßgerätes zum Spannungsmesser

Bekanntlich wirken die Kapselkapazität und die Eingangskapazität des Vorverstärkers als kapazitiver Spannungsteiler, durch den die Leerlaufspannung der Kapsel herabgesetzt wird. Um diesen Effekt bei der elektrischen Kalibrierung unverfälscht erfassen zu können, muß die Kapazität C_K des Meßkondensators, über den die Einspeisung der Kalibrierung erfolgt, mit der inneren Kapazität der nachzubildenden Kapsel übereinstimmen. In den technischen Daten ist für die beiden Vorverstärker MV 102 und MV 201 der Zusatzfehler angegeben, der bei der elektrischen Kalibrierung auftreten kann, wenn die tatsächliche Kapselkapazität um 10 % von der Kapazität des Meßkondensators abweicht.

Bild 38: Innere Beschaltung der Meßkondensatoren K 63, K 65 und K 67



Technische Daten:

Meßkon- densator Typ	Ersatz für Kapsel Typ	C_K	C_p	Zusatzfehler durch 10 % Kapazitäts- abweichung für Vorverstärker	
				MV 102	MV 201
K 63	MK 102	68 pF	5,6 nF	0,1 dB	0,01 dB
K 65	MK 201	22 pF	5,6 nF	0,2 dB	0,03 dB
K 67	MK 301	5,6 pF	5,6 nF	0,4 dB	0,1 dB

Die parallel zur Eingangsbuchse geschaltete Querkapazität C_p legt die Ersatzkapazität C_K bei offenem Eingang praktisch eingangsseitig an Masse, so daß sich in diesem Zustand die Eigenstörspannung der Meßkette ermitteln läßt. Für eine an die Eingangsbuchsen angeschlossene niederohmige Spannungsquelle (Signalgenerator) stellt die Querkapazität C_p dagegen eine vernachlässigbar kleine Last dar, die die Signaleinspeisung nicht merklich beeinflußt.

5.6. Drehtisch 02 012

Der im Bild 39 dargestellte Drehtisch 02 012 ist ein wertvolles Hilfsmittel für alle Anwendungen, bei denen ein Prüfobjekt (Lärmquelle, Schallwandler, Antenne) definiert um eine Achse zu drehen ist. Er ist in erster Linie für die Aufnahme der Richtcharakteristik von Schallsendern und -empfängern vorgesehen, wobei das Meßergebnis durch einen parallel-

Bild 39: Drehtisch 02 012



laufenden Pegelschreiber 02 013 direkt auf Polarkoordinatenpapier aufgezeichnet werden kann. Darüber hinaus ist die Möglichkeit des automatischen Stops in vorprogrammierten Winkelstellungen gegeben, um diskrete Meßwerte zu ermitteln und in digitaler Form weiterzuverarbeiten.

Eine wichtige Betriebsart ist schließlich die Substitutionskalibrierung, bei der der Drehtisch relativ rasch zwischen den Winkelstellungen 0° und 180° hin- und zurückläuft. Zwei an einem Doppelgalgen angeordnete Mikrofone — ein Prüfling und ein Normal — lassen sich damit nacheinander an den gleichen Punkt in einem Schallfeld bringen, so daß eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung des im Abschnitt 4.1.2. beschriebenen Substitutionsverfahrens einfach und mit hoher Genauigkeit erfüllt werden kann. Ein Bohrfutter und mehrere Gewindelöcher erleichtern die Befestigung unterschiedlicher Prüfobjekte.

Technische Daten:

- Drehgeschwindigkeit 0,75 Umdrehungen pro Minute für Richtcharakteristikkmessungen
3 Umdrehungen pro Minute für Substitutionsmessungen
- Drehrichtung beliebig
- Programmierbare Winkelstellungen beliebig aller 15°
 0° und 180° für Substitutionskalibrierung
- Zulässige Massenbelastung ≤ 100 kg bei zentrischer Wirkung
- Steuerungsmöglichkeiten manuell über Bedienfeld am Drehtisch oder mitgeliefertes Fernbedienteil
elektrisch mit Steuersignalen nach Standard-Interface SI 1 2 oder 24-V-Relaissteuerung (für Pegelschreiber PSG 101)

Ausführliche Angaben über den zweckmäßigen Einsatz des Drehtisches 02 012 sind in einer speziell diesem Thema gewidmeten Applikationsschrift [17] zu finden.

5.7. Elektrodynamischer Eich Tisch 11032

Der in Bild 40 dargestellte Elektrodynamische Eich Tisch 11 032 ist ein tragbarer batteriebetriebener Schwingungserreger, der zur raschen Überprüfung und mechanischen Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern, -meßgeräten und ganzen Meßketten vorgesehen ist. Das Gerät besitzt zwei gegenüberliegende Koppelflächen, so daß Vergleichsmessungen an zwei Schwingungsaufnehmern möglich sind.

Wie aus dem Funktionsschema nach Bild 41 hervorgeht, bildet das Erregersystem einen Zweimassenschwinger, der elastisch gegenüber dem Gehäuse aufgehängt ist. Der federnd aufgehängte Permanentmagnet, der die innere Masse m ,

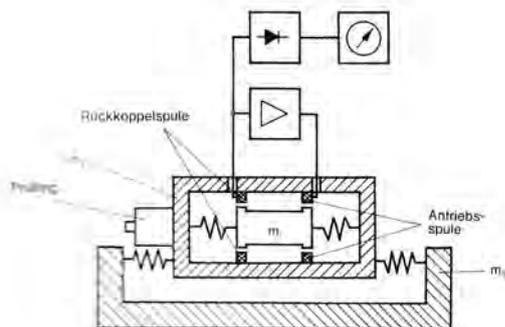


Bild 40: Elektrody-nami-scher Eich-tisch 11 032

darstellt, bildet mit dem Stahlkörper der äußeren Masse m_a einen Magnetkreis, in dessen Luftspalt sich die Antriebs- und die Rückkoppelspule befinden. Der Verstärker ist so ausgelegt, daß im geschlossenen Wirkungskreis die Selbsterregungsbedingung nach Gleichung (27) erfüllt ist, so daß innere und äußere Masse nach dem Reaktionsprinzip gegenphasig zu schwingen beginnen. Die Schwingfrequenz entspricht etwa der Resonanzfrequenz des mechanischen Systems.

Bild 41: Vereinfachtes Funktionsschema des Elektrody-nami-schen Eich-tisches 11 032

- m_a = äußere Masse (Stahlkörper)
- m_i = innere Masse (Permanentmagnet)
- m_g = Gehäusemasse



Technische Daten:

- Signalform Mechanische Sinusschwin-gung:
Klirrfaktor $k \leq 3 \%$
- Erzeugte Schwingungs-größen Schwingbeschleunigung
 $a = 10 \text{ m s}^{-2} \pm 5 \%$
Schwinggeschwindigkeit
 $v = 20 \text{ mm s}^{-1}$
Schwingweg $\xi = 40 \mu\text{m}$
- Schwingfrequenz 79,6 Hz
(entspricht $\omega = 500 \text{ s}^{-1}$)
- Zulässige Masse der zu kalibrierenden Aufnehmer $< 1 \text{ kg}$

Das verwendete Wirkprinzip gewährleistet, daß sich die Massenbelastung durch die zu kalibrierenden Aufnehmer nur geringfügig auf Stärke und Frequenz der erzeugten Schwingung auswirkt. Der noch verbleibende Einfluß der Aufnehmermasse kann einem aufgedruckten Diagramm entnommen werden.

5.8. Aufnehmer-Eichgerät 11 072

Das Aufnehmer-Eichgerät 11 072 bildet zusammen mit einem NF-Signalgenerator einen vollständigen Meßplatz zur Bestimmung des Übertragungsfaktors von Schwingungsaufnehmern über einen weiten Frequenzbereich. Mit dem Gerät lassen sich sowohl sehr genaue Absolutmessungen nach dem Reziprozitätsverfahren (siehe Abschnitt 4.1.3.) als auch Vergleichsmessungen nach dem Parallelverfahren (siehe Abschnitt 4.1.2.) durchführen.

Zum Lieferumfang des Aufnehmer-Eichgerätes gehört ein spezieller Schwingungserreger, der mit zwei mechanisch gekoppelten, aber elektrisch voneinander getrennten Schwing-systemen ausgestattet ist. Beim Reziprozitätsverfahren dient eines der Schwingssysteme als umkehrbarer Wandler, der zunächst als Empfänger und anschließend als Sender betrieben wird, während beim Vergleichsverfahren beide Systeme gemeinsam zur Anregung dienen. Der durchgehende Schwingbolzen ist an beiden Stirnseiten mit Auflageflächen und Gewindebohrungen zur Aufnahme der zu messenden Schwingungsaufnehmer versehen.

Der Elektronikteil des Aufnehmer-Eichgerätes ist unter anderem mit einem hochgenauen dreistufigen Spannungsteiler und einem Anzeigeinstrument ausgestattet. Der Kalibriervorgang wird bei beiden Verfahren auf die Messung von Spannungsverhältnissen zurückgeführt, die sich nach Einstellung gleicher Anzeigewerte direkt von den Bedienelementen des Spannungsteilers im Pegelmaßstab ablesen lassen.

Wie bereits im Abschnitt 4.1.3. erläutert, gehören zum Reziprozitätsverfahren zwei Meßschritte. Im vorliegenden Fall dient zunächst das System 1 des Schwingungserregers als Antriebsquelle; gemessen wird das Verhältnis

$$V_1 = \tilde{u}_{31} / \tilde{u}_{21} \quad (28)$$

mit \tilde{u}_{21} = Ausgangsspannung des Systems 2
 \tilde{u}_{31} = Ausgangsspannung des Prüflings

Im zweiten Schritt erfolgt die Anregung durch das (jetzt als Sender betriebene) System 2 des Schwingungserregers; gemessen wird das Verhältnis

$$V_2 = \tilde{u}_{32} / \tilde{u}_{j2} \quad (29)$$

mit $\tilde{u}_{j2} = R_{mess} \cdot \tilde{i}_2$ = Spannung, die dem Antriebsstrom durch das System 2 proportional ist

\tilde{u}_{32} = Ausgangsspannung des Prüflings
 Der gesuchte Übertragungsfaktor B_u des Prüflings ergibt sich damit zu

$$B_u = \frac{\tilde{u}}{a} = c \sqrt{\frac{V_1 V_2}{\omega}} \quad (30)$$

mit a = Schwingbeschleunigung
 c = vom Hersteller angegebene Konstante, abhängig von der Masse des Schwingsystems und vom Meßwiderstand R_{mess}
 ω = Kreisfrequenz

Das Vergleichsverfahren kommt mit der Messung eines Spannungsverhältnisses aus, jedoch setzt das Verfahren voraus, daß außer dem unbekanntem Prüfling noch ein weiterer Aufnehmer mit genau bekanntem Übertragungsfaktor als Normal zur Verfügung steht. Für die Berechnung der Kennwerte gelten die Gleichungen (18a) und (18b).

Technische Daten:

- Gesamtmasse der Aufnehmer ≤ 300 g
- Arbeitsfrequenzbereich und Fehlergrenzen:

Verfahren	Aufnehmermasse	Fehlergrenzen	Frequenzbereich
Reziprozität	≤ 50 g	$\pm 2\%$	50 ... 2000 Hz
		$\pm 3\%$	20 ... 3000 Hz
	50 ... 150 g	$\pm 2\%$	50 ... 1500 Hz
		$\pm 5\%$	20 ... 2500 Hz
	150 ... 300 g	$\pm 2\%$	50 ... 1500 Hz
		$\pm 3\%$	16 ... 1500 Hz
Vergleich (Verhältnis der Aufnehmermassen $\approx 1:1$)	≤ 50 g	$\pm 3\%$	10 ... 2000 Hz
	≤ 150 g	$\pm 3\%$	10 ... 1500 Hz

Zur Erzeugung des Meßsignals sind alle handelsüblichen Niederfrequenz-Signalgeneratoren mit niederohmigem Ausgang geeignet. Darüber hinaus empfiehlt es sich, zur Kontrolle der Signalform ein Oszilloskop an das Aufnehmer-Eichgerät anzuschließen.

	Seite
1. Einleitung	1
2. Ziel der Kalibrierung	1
3. Allgemeine meßtechnische Grundlagen	2
3.1. Meßgrößen der Schall- und Schwingungsmesstechnik	2
3.2. Aufbau einer Meßkette zur Erfassung von Luft- und Körperschall	3
3.3. Zusammenwirken von Funktionsblöcken in einer Meßkette	5
3.3.1. Übertragungsfaktor und Übertragungsmaß	5
3.3.2. Zusammenschaltung von Vierpolen	6
3.4. Anpassung der Wandler an das Meßgerät	8
3.4.1. Kondensator-Meßmikrofon	8
3.4.2. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer — direkt angeschlossen	10
3.4.3. Anschluß piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer über Adapter	11
3.5. Pegelverhältnisse innerhalb der Meßkette	11
4. Meß- und Kalibrierverfahren zur Vorbereitung der Meßkette	13
4.1. Akustische oder mechanische Kalibrierung	13
4.1.1. Absolutkalibrierung	14
4.1.2. Vergleichskalibrierung	14
4.1.3. Reziprozitätsverfahren	16
4.1.4. Ersatzspannungsverfahren	16
4.1.5. Eichgitterverfahren	17
4.2. Elektrische Kalibrierung	18
4.2.1. Simulation eines elektrischen oder akustischen Prüfsignals durch eine Kalibrierspannung	18
4.2.2. Pfeifpunkt kalibrierung	20
5. Kalibrier- und Hilfsgeräte	23
5.1. Pistofon	23
5.2. Akustischer Kalibrator 05 000	24
5.3. Kugelfall-Prüfschallquelle PSQ 101	25
5.4. Elektrostatisches Eichgitter	26
5.5. Meßkondensator	27
5.6. Drehtisch 02 012	28
5.7. Elektrodynamischer Eich Tisch 11 032	28
5.8. Aufnehmer-Eichgerät 11 072	29
Standard- und Literaturverzeichnis	31

Standard- und Literaturverzeichnis

- [1] Akustische Meßaufgaben — Geräte und Meßplätze. Applikationsschrift des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden
- [2] Handbuch der Akustik des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden mit Meßplatzbeschreibungen für P-Meßplätze (Meßwertaufzeichnung durch Pegelschreiber), D-Meßplätze (digitale Meßwertausgabe durch Drucker oder Lochbandstanzer) und R-Meßplätze (On-line-Meßwertverarbeitung durch Rechner)
- [3] Applikationsschriften des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden:
 - Einsatz des Dauerschallpegelmessers Typ 00 005
 - Methoden zur Ermittlung des Schalleistungspiegels — Geräte-technische Ausrüstungen
 - Admittanzmessungen bei Stützkonstruktionen
 - Einsatz des SM-Systems bei der Schwingungsisolierung von Maschinen
 - Ermittlung des kraftbezogenen Schalleistungspiegels
 - Zweck und Vorteile der Zeitbewertung „Impuls“ für die Schallpegelmeßpraxis
- [4] IEC Publication 651: Sound Level Meters. Ausgabe 1979
- [5] ST RGW 1351-78: Schallpegelmesser. Ausgabe 1978
- [6] ISO 2631: Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. ISO, Juli 1974
- [7] VDI-Richtlinie 2057: Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Oktober 1963
- [8] IEC Publication 225: Octave, Half-Octave and Third-Octave Band Filters Intended for the Analysis of Sounds and Vibrations. IEC, 1966
- [9] KRAAK, W.; WEISSING, H.: Schallpegelmeßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970
- [10] Autorenkollektiv unter W. SCHIRMER: Lärmbekämpfung. Berlin: Verlag Tribüne, 1974
- [11] SCHIRMER, W.: Lärmmeßtechnik. Heft 37 der Schriftenreihe Arbeitsschutz. Berlin: Verlag Tribüne, 1974
- [12] SERBITZER, J.: Messung und Beurteilung von Schwingungseinwirkungen auf den Menschen. Heft 34 der Schriftenreihe Arbeitsschutz. Berlin: Verlag Tribüne, 1974
- [13] FASOLD, W.; SONNTAG, E.: Bauphysikalische Entwurfslehre; Teil 4: Bauakustik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1972
- [14] HOLZWEISSIG, F.; MELTZER, G.: Meßtechnik der Maschinendynamik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1973
- [15] Eigenschaften und Anwendung von Meßmikrofonen und Zubehör. Applikationsschrift des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden
- [16] HARRIS, C.M.: Handbook of Noise Control. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company Inc., 1957
- [17] Meßplätze zur Bestimmung der Richtungseigenschaften von Schallsendern und -empfängern sowie zur Substitutionskalibrierung von Mikrofonen. Applikationsschrift des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden

Hersteller:
VEB Robotron
Meßelektronik »Otto Schön«
DDR - 8012 Dresden
Postschließfach 211
Telefon: 48 70
Telex: komkd 26068
Kabel: komkd

Kundendienst:
Zentraler Auslands-Service
Elektronische Meßtechnik
DDR - 1035 Berlin
Oderstraße 1
Telefon: 5 80 02 41
Telex: zamdd 11-2355
Kabel: zamservice

**Rationell messen,
prüfen,
automatisieren**

Unser Liefer- und Leistungsprogramm:

Geräte der Analysen - und Strahlungsmeßtechnik
Radiometrische Meßverfahren
für den industriellen Einsatz
Geräte der Schall - und Schwingungsmeßtechnik
Fehlerortungsgeräte für Kabel und Leitungen
Geräte zur Messung mechanischer Größen
Projektierung, Applikation und Sonderbau

Im Interesse der technischen Weiterentwicklung behalten wir uns Abweichungen von den genannten technischen Daten und Abbildungen sowie Beschreibungen vor. Anfragen zum neuesten Stand unserer Erzeugnisse richten Sie bitte mit Angabe folgender Druckschriften-Nr. an uns: 01/013 d. Ausgabe 1980

Herausgeber: VEB Robotron - Meßelektronik
„Otto Schön“ Dresden
Abt. Werbung und Messen
Autoren: Dr.-Ing. H. Weißing
Dipl.-Ing. Wießner
Herstellung: DEWAG DRESDEN (32 462 051 / 8)
Grafik: Mittag
Regie: Wurm
Druck: ODW II 20 8 Ag 26 062 80 - 1826