

Das Übertragungsmaß der Mikrophone bei tiefen Frequenzen und seine Messung

G. BORÉ

Sonderdruck aus **F&KT**, 32. Jahrgang, Heft 3, 1978, Seite 101

Das Übertragungsmaß der Mikrophone bei tiefen Frequenzen und seine Messung

G. BORÉ

Der Verfasser diskutiert die Gründe, die bei der Messung des Übertragungsmaßes von Mikrophenen im Bereich tiefer Frequenzen zu Meßfehlern führen. Er schlägt vor, den Frequenzgang des Übertragungsmaßes und die Richtcharakteristik für einen bestimmten, noch zu normenden Freifeld-Meßabstand anzugeben, und er zeigt an einem Beispiel die Durchführung der vorgeschlagenen Meßmethode.

1. Einleitung

Mikrophone werden überall in der Welt im reflexionsarmen Raum geprüft: Ein Lautsprecher betönt – meist gleichzeitig – ein Bezugsmikrofon, dessen Daten bekannt sind, und das zu prüfende Mikrofon. Die Frequenz des Prüfsignals wird dabei stetig verändert, so daß der ganze Übertragungsbereich überstrichen wird. Das Bezugsmikrofon hat einen ebenen Frequenzgang, und seine Ausgangsspannung wird in einer Regelschaltung dazu benutzt, den vom Lautsprecher abgestrahlten Schalldruck konstant zu halten. Der vom Prüfling abgegebene Spannungsverlauf entspricht dann unmittelbar seinem Frequenzgang und kann mit einem Schreiber aufgezeichnet werden (Bild 1).

Im Bereich der mittleren und höheren Frequenzen führt dieses Meßverfahren im allgemeinen schnell zu recht genauen Ergebnissen. Bei den tieferen Frequenzen bereitet die exakte Mes-

auch in verhältnismäßig großen Meßräumen bei tiefen Frequenzen anders ausbreitet als im Freien. Schallwellen, die sich in der Nähe einer schallschluckend verkleideten Wand oder Decke fortpflanzen, werden mehr oder weniger stark in diese hineingebogen. Das gilt vorwiegend für Schallwellen im Tieftonenbereich, deren Wellenlänge nicht mehr klein im Vergleich zu ihrem Abstand von der betreffenden Schallschluckfläche ist¹⁾.

Im Meßraum nimmt der Schall daher schneller mit der Entfernung ab, und die Schallwellenfronten werden stärker gekrümmt, als es im Freien der Fall wäre. Man nennt diesen Vorgang den „Kanaleffekt“ (Bild 2).

3. Druckmikrophone

Welchen Einfluß hat der Kanaleffekt auf die Mikrofonprüfung? Für Druckmikrophone, die das Schallfeld angenä-

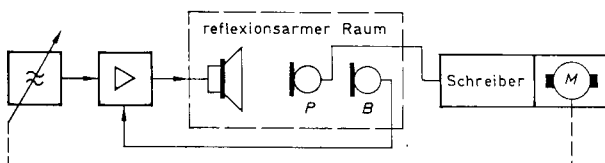


Bild 1. Schematische Darstellung einer Frequenzgang-Schreibanlage (B = Bezugsmikrofon, P = Prüfling)

sung Schwierigkeiten, und das Ergebnis fällt oft von Meßraum zu Meßraum verschieden aus. Auf die Ursachen sei im folgenden eingegangen.

2. Das Schallfeld im reflexionsfreien Raum

Die Meßräume dürfen im gesamten Frequenzbereich vor allem keine Reflexionen haben. Mit den heute herstellbaren Schallschluck-Anordnungen läßt sich diese Forderung im allgemeinen erfüllen – vielfach bis hinab zur Frequenz 40 Hz, obwohl das schon einigen Aufwand erfordert. Weniger beachtet wird aber gelegentlich, daß sich der Schall

hert nur an einem Punkt abtasten, bringt er kaum Schwierigkeiten. Sie können zumindest dann exakt gemessen werden, wenn Prüfling und Bezugsmikrofon gleichen Abstand vom Lautsprecher und angenähert auch von der schallschluckenden Auskleidung haben oder wenn nacheinander am selben Ort gemessen wird.

Sehr häufig sind aber beide Mikrophone nicht neben-, sondern 20 bis 50 cm hintereinander angeordnet, damit bei hohen Frequenzen der an den Mikrophongehäusen reflektierte Schall weniger stört und damit eine nicht ganz gleichmäßige Schallabstrahlung des Lautsprechers in die verschiedenen

Richtungen keine Fehler hervorruft. Stehen zum Beispiel der Prüfling 100 cm und das Bezugsmikrofon 130 cm vor dem Lautsprecher, so empfängt das letztere im ungestörten Schallfeld einen um das 100/130fache kleineren Schalldruck; das sind 2,3 dB weniger als der Prüfling. In einem reflexionsarmen Raum mittlerer Größe (lichte Abmessungen 3,2 m × 4,2 m × 2,8 m) wurden jedoch für zwei in diesen Abständen angeordnete Mikrophone als Folge des Kanaleffekts bei Frequenzen unter 100 Hz Schalldruckunterschiede von bis zu 4,8 dB gemessen. Läßt man dies unberücksichtigt, so

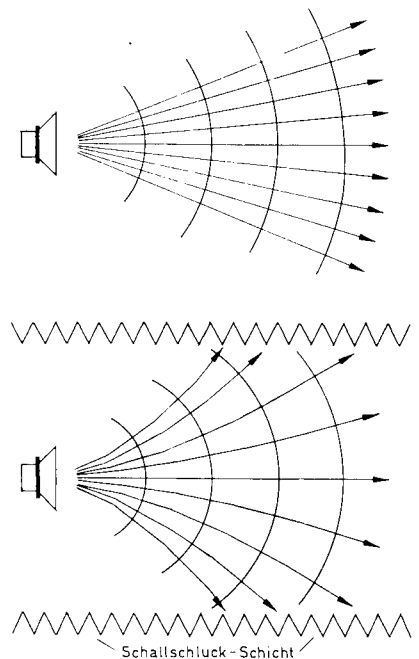


Bild 2. Zur Veranschaulichung der Begriffe „Kanaleffekt“ und „Krümmung der Schallwellenfront“. Oben: ungestörtes Schallfeld; unten: Schallausbreitung bei schallschluckender Auskleidung (tiefe Frequenzen)

wird für alle gemessenen Mikrophone ein um bis zu 4,8 – 2,3 = 2,5 dB zu großer Pegel, meist also ein scheinbar „zu guter“ Frequenzgang, angezeigt: Das Bezugsmikrofon stellt fest, daß der Schalldruck an seinem Aufstellungsort um 2,5 dB abfallen will, und sorgt dafür, daß dem Lautsprecher entsprechend mehr Leistung zugeführt wird.

Diesen Fehler kann man natürlich leicht durch eine entsprechende Anhebung im Frequenzgang des Meßmikrophons beheben. Es ist jedoch zu ver-

Dr.-Ing. Gerhart Boré ist Leiter der Mikrofonentwicklung bei der Georg Neumann GmbH, Berlin.

¹⁾ Bei 40 Hz ist die Schallwellenlänge in Luft 8,50 m.

muten, daß dies nicht von allen Stellen durchgeführt wird²⁾.

4. Druckgradienten-Mikrophone

Wesentlich schwieriger ist die exakte Mikrofonmessung im Tieftonbereich bei Druckgradienten-Mikrophonen. Zum besseren Verständnis sei kurz noch einmal auf die Arbeitsweise dieser Mikrophone eingegangen: Bei ihnen sind Vorder- und Rückseite der Membran dem Schallfeld ausgesetzt³⁾. Das Schallfeld wird also an zwei hintereinanderliegenden Stellen abgetastet. Im ideal-ebenen Schallfeld ist an beiden Stellen ein gleich großer Schalldruck wirksam. Die Wirkung des Mikrophons beruht dann nur darauf, daß die Rückseite der Membran später und deshalb mit anderer Phasenlage vom Schall erreicht wird.

Die aus der Phasendifferenz resultierenden, die Membran bewegendenden Kräfte sind für die tiefsten Frequenzen sehr klein. Bei Mikrophenen mit den üblichen Abmessungen ist der maßgebende Phasenwinkel für 40 Hz nur 1 bis 3°. Er steigt natürlich zu höheren Frequenzen hin stetig an.

Im Kugelschallfeld, also auch in reflexionsarmen Räumen, nimmt der Schalldruck mit der Entfernung ab. Deshalb wirkt zusätzlich zu der nur phasenbedingten Kraft auf die Membran noch der Unterschied der Schalldruckamplituden – vorn und hinten – als Antriebskraft. Obwohl nur sehr klein, kann er sich bei tiefen Frequenzen stark „anhebend“ auf den Frequenzgang auswirken („Naheffekt“), weil hier die aus der Phasendifferenz resultierende, vom Abstand unabhängige Antriebskraft am kleinsten ist.

Allgemein hängen also bei Druckgradienten-Mikrophonen der Frequenzgang des Übertragungsmaßes und die Richtcharakteristik im Nahfeld auch noch vom Schallquellenabstand ab. Um von dieser Einflußgröße, deren Auswirkung je nach Aufbau von Mikrophen zu Mikrophen verschieden sein kann, unabhängig zu werden, schreibt DIN 45 591 die Messung „im ebenen Schallfeld“ vor, theoretisch also im Abstand „unendlich“.

Lediglich für spezielle Mikrophone, die nur bei tiefen Frequenzen als Druckgradienten-Empfänger arbeiten und schon bei einer mittleren Frequenz auf Druckempfang übergehen und hier ihre Richtwirkung dem Interferenzeffekt verdanken, darf der Phasenwinkel größer sein; der „Naheffekt“ und die damit verbundenen Probleme treten dann nicht auf.

²⁾ Der hier als Beispiel gewählte Meßraum wurde schon bei seiner Inbetriebnahme vor vielen Jahren mit einer entsprechenden Entzerrung ausgestattet.

³⁾ Es gibt auch Gradientenmikrophone, bei denen zwei räumlich versetzte Membranen elektrisch gegeneinandergeschaltet werden.

5. Die Messung im reflexionsfrei abgeschlossenen Rohr

Ein auch für tiefe Frequenzen nahezu ideales Schallfeld läßt sich in einem hinreichend großen, reflexionsfreien Rohr nachbilden. In DIN 45 591 sind einige Bedingungen angegeben, die ein solches Rohr erfüllen muß. Als Abschluß ist ein Schluckkeil zweckmäßig. Er sollte für Messungen bis hinab zur Frequenz 40 Hz wenigstens 2,20 m lang sein ($1/4$ der Wellenlänge). Auch muß der Rohrdurchmesser so groß sein, daß der Rohrquerschnitt durch die Abmessungen des Mikrophons praktisch nicht verkleinert wird. Leider steht ein solches Rohr zur Zeit nur sehr wenigen Stellen zur Verfügung⁴⁾.

Man darf zwar im Freien die Verhältnisse des „ebenen Schallfeldes“ schon in einer Entfernung, die der Schallwellenlänge entspricht, als hinreichend angenähert ansehen. Witterungs- und Umwelteinflüsse verhindern aber fast stets das exakte Messen im Freien.

6. Meßprobleme im reflexionsarmen Raum

Wie ist es aber im reflexionsarmen Raum? Hier wird die Krümmung der Wellenfronten und damit die Schalldruckabnahme mit zunehmender Entfernung bei tiefen Frequenzen durch die schallschluckende Verkleidung noch vergrößert (Bild 2), und dadurch wird der Meßabstand, der eigentlich möglichst groß sein müßte, scheinbar noch verkleinert. Der „Naheffekt“ der Druckgradienten-Mikrophone⁵⁾, dessen Einfluß bei der Messung nach DIN 45 591 ausgeklammert bleiben soll, wirkt sich hier noch stärker aus als im Freien, und die tieffrequenten Schallanteile werden stärker angehoben als bei einer Messung im gleichen Abstand im Freien.

In den Meßräumen der üblichen Abmessungen lassen sich jedenfalls für tiefere Frequenzen die Verhältnisse des ebenen Schallfeldes auf keinen Fall auch nur angenähert verwirklichen. Man sollte daher erwägen, ob man nicht besser alle Angaben anstatt für das ebene Schallfeld gleich für einen bestimmten, einheitlich festzulegenden Schallquellenabstand machen sollte – einen Abstand, der sich in den meisten reflexionsarmen Räumen noch nachbilden läßt. Die bisher vorgeschriebene Messung im „ebenen Schallfeld“

⁴⁾ Dem Verfasser steht seit 16 Jahren ein Rohr zur Verfügung, das sogar noch bei 25 Hz einwandfreie Messungen „im ebenen Schallfeld“ ermöglicht. Es ist 14 m lang bei 44 cm Innendurchmesser, hat einen über 4 m langen Steinwolle-Sluckkeil und ist in Sand gebettet, damit bei hohen Schalldrücken ein Mitschwingen der 4 cm dicken Rohrwandung mit Sicherheit verhindert wird.

⁵⁾ Reuber, C.: Taschenbuch der Unterhaltungselektronik 1973/74, S. 42...44. Berlin: Schiele und Schön.

ist zwar die physikalisch „sauberste“ und am wenigsten durch Randbedingungen erschwerte Meßmethode. Überprüft man jedoch die für die tiefen Frequenzen gemachten Angaben der angebotenen Druckgradienten-Mikrophone, so findet man nahezu keinen Mikrophontyp, dessen Daten auch nur annähernd für das „ebene Schallfeld“ Gültigkeit haben, wie es DIN 45 591 vorschreibt.

Viele dieser Mikrophone gelten dennoch als hochwertig und werden gern eingesetzt – vielleicht, weil die Meßverfahren, die ihren Datenplättchen zugrunde liegen, zwar nicht normgemäß, aber anwendungsbezogener sind. Auch im praktischen Einsatz werden die Mikrophone ja immer seltener in großem Abstand von der aufzunehmenden Schallquelle aufgestellt.

Am Beispiel eines kleinen Kondensator-Druckgradienten-Mikrophons zeigt Bild 3, wie stark die Meßwerte bei den tiefen Frequenzen von Raum zu Raum streuen und in welchem Maße sie von den für das ebene Schallfeld gültigen Werten (Rohrmessung) abweichen können. Es handelt sich um gemessene Werte, die in einem kleineren (a) und einem etwas größeren (b) reflexionsarmen Raum, 1 m vor dem Lautsprecher, und im Rohr (c) durch Vergleich mit demselben Meßmikrophen aufgenommen wurden.

Bild 4 zeigt, welchen Einfluß das Schallfeld auf das Richtdiagramm des-

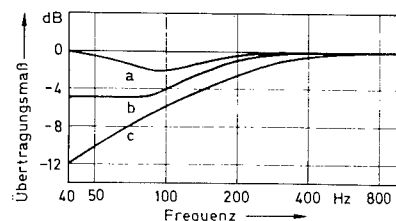


Bild 3. Frequenzgang eines kleinen Druckgradienten-Mikrophons, gemessen a) in einem kleinen reflexionsarmen Raum, b) in einem größeren reflexionsarmen Raum, c) im reflexionsfrei abgeschlossenen Rohr

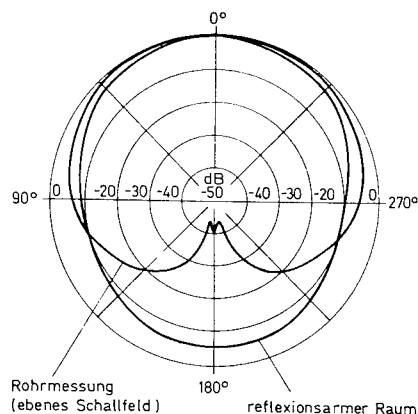


Bild 4. Richtdiagramm eines Kondensator-Kleinkondensatormikrophons bei 40 Hz, gemessen im reflexionsfreien Raum und im Rohr

selben Mikrophons bei sehr tiefen Frequenzen haben kann.

Leider ist eine allgemeingültige Umrechnung von im Nahfeld gemessenen Werten auf die für das ebene Schallfeld gültigen Daten nicht möglich, weil es sowohl Gradienten-Mikrophone gibt, die bis zu tiefen Frequenzen als solche arbeiten, als auch andere Typen, die bei tiefen Frequenzen auf eine Kugelcharakteristik übergehen.

7. Vorschlag für eine praxisbezogene Messung

Um auch im Tieftonbereich zu vergleichbaren Datenangaben zu kommen, die überall richtig gemessen werden können und nicht mehr, wie bisher, vorzugsweise vom benutzten Meßraum abhängen, wird folgendes vorgeschlagen: Der Frequenzgang des Übertragungsmaßes und die Richtcharakteristik sind für einen bestimmten, einheitlich festzulegenden Freifeld-Meßabstand anzugeben. Für jeden reflexionsarmen Raum muß einmalig ermittelt werden, in welchem Abstand vom Lautsprecher sich die Verhältnisse dieses Freifeld-Meßabstandes einstellen. Eine einfache Methode hierfür ist in DIN 45 573 Teil 1, Abs. 2.5. angegeben und wird am Schluß dieses Aufsatzes beschrieben.

Die Lautsprecherabstände im Meßraum werden stets größer sein, weil die stärkere Schallfeldkrümmung (Kanaleffekt) auch noch in weiterer Entfernung eine größere Nähe der Schallquelle vortäuscht. Will man einen Zahlenwert für den festzulegenden Freifeld-Meßabstand festlegen, so scheint es zunächst vernünftig, den Wert „1 Meter“ hierfür vorzuschreiben. Indessen hat sich gezeigt, daß der Kanaleffekt nicht nur in kleinen, sondern auch schon in mittelgroßen Meßräumen so wirksam sein kann, daß sich auch bei entfernter Mikrophonauflistung kein Punkt mehr finden läßt, an dem die Schallfeldverhältnisse dem Freifeld-Meßabstand 1 m entsprechen. Man muß daher schon einen kleineren Wert festlegen, damit auch die Stellen, die nur über kleinere oder schmalere reflexionsarme Räume verfügen, einheitlich messen können. Ein Freifeld-Abstand von 60 cm wäre diskutabel.

7.1. Zur Durchführung der vorgeschlagenen Meßmethode

Anhand eines Zahlenbeispiels sei erläutert, wie die empfohlenen Messungen ausgeführt werden können. Als Freifeld-Meßabstand, für den die Angaben gemacht werden sollen, sei der Wert „60 cm“ angenommen.

Man richtet zunächst eine Tabelle ein, in der links einige Frequenzen aus dem Bereich 40 ... 160 Hz und rechts die zugehörigen (größeren) nach dem am

Schluß des Aufsatzes angegebenen Verfahren ermittelten Lautsprecherabstände eingetragen sind. Eine derartige Tabelle sieht beispielsweise folgendermaßen aus:

f	s
40 Hz	97 cm
50 Hz	120 cm
63 Hz	116 cm
80 Hz	70 cm
100 Hz	68 cm
120 Hz	71 cm
160 Hz	62 cm

(f = Frequenz. s = Mikrophonabstand im betreffenden reflexionsarmen Raum, für den die Krümmung der Schallwellen ebenso stark ist wie in 60 cm Freifeld-Abstand.)

Für 63 Hz liegt der Aufstellungsort des Mikrophons in diesem Meßraum 116 cm vor dem Lautsprecher. In diesem Abstand werden nacheinander Meßmikrophon und Prüfling aufgestellt und mit Schall der Frequenz 63 Hz beaufschlagt. Der Pegelunterschied (nicht der Absolutwert) beider Mikrophonspannungen wird notiert. Weil das Übertragungsmaß des Meßmikrophons (Druckempfänger) bekannt und vom Abstand unabhängig ist, läßt sich aus dem Unterschied leicht der gesuchte Wert für den Prüfling berechnen. Er trägt die Bezeichnung „Freifeld-Übertragungsmaß für 60 cm Abstand bei 63 Hz“.

Hat man mit jedem Mikrophontyp einmalig diese verhältnismäßig umständliche Messung für einige Frequenzen durchgeführt, kann man die Routinemessung der Mikrophone wieder in der herkömmlichen Weise (s. Bild 1) durchführen. Den Datenblättern darf man natürlich nicht die hierbei ermittelten Werte zugrunde legen. Man kann aber die Differenz zwischen den Werten, die sich hierbei und bei der (einmalig ausgeführten) Messung nach dem oben vorgeschlagenen Verfahren für das Übertragungsmaß des benutzten Mikrophons ergab, dazu benutzen, um die geschriebenen Meßwerte und Kurven des betreffenden Mikrophontyps zu berichtigen. Sie gelten dann nicht mehr für die Verhältnisse in einem ganz bestimmten Meßraum, sondern ganz allgemein für einen Freifeld-Abstand von beispielsweise 60 cm.

Soweit Richtdiagramme bei einzelnen Frequenzen aufgenommen werden, sollte man das für tiefe Frequenzen allerdings tatsächlich an den tabellarisch erfaßten speziellen Aufstellungs-orten im Meßraum durchführen.

Daneben bleibt es natürlich jedem Hersteller unbenommen, zusätzlich auch Werte für andere Abstände und möglichst auch für das ebene Schallfeld anzugeben. Die Angaben für den (noch festzulegenden) Freifeld-Abstand sollten aber in jedem Fall in den Mikrophon-Datenblättern enthalten sein, weil nur diese Werte mit einiger Sicherheit auch bei tiefen Frequenzen überall

richtig gemessen und daher vom Anwender für einen objektiven Vergleich verschiedener Mikrophone herangezogen werden können.

Abschließend sei nochmals betont, daß alles Gesagte nur für den Bereich der tiefen Frequenzen gilt. Bei und oberhalb etwa 160 Hz, gelegentlich auch schon oberhalb 100 Hz, werden die Unterschiede zwischen den auf verschiedene Art und an verschiedenen Orten gewonnenen Meßwerten für Übertragungsmaß und Richtcharakteristik schnell vernachlässigbar klein.

8. Anhang

Um für eine Stelle A im Abstand s_1 vor dem Lautsprecher festzustellen, welcher Freifeld-Abstand an dieser Stelle dem Mikrophon vorgetäuscht wird, trägt man den Reziprokwert des Schalldrucks $1/p$ als Funktion des Abstands s auf und verbindet die den Abständen s_2 und s_3 zugeordneten Kurvenpunkte (beiderseits von s_1) durch eine Gerade. Die Parallele zu dieser Geraden durch den dem Abstand s_1 zugeordneten Kurvenpunkt schneidet die Abszisse im

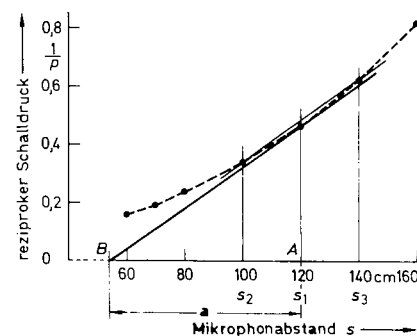


Bild 5. Graphische Ermittlung des Freifeld-Abstands a , der einem Mikrophon in der Entfernung s vom Lautsprecher vorgetäuscht wird. Der Punkt $s = 0$ und die Teilung der Ordinate für $1/p$ sind beliebig wählbar

Punkt B. Die Strecke A B entspricht dann dem am Punkt A, also im Abstand s_1 vorgetäuschten Freifeld-Abstand a . Im gewählten Beispiel (Bild 5) ist $a = 66$ cm. Der Vorgang ist daher für andere Mikrophonabstände s zu wiederholen, bis sich für a der Wert 60 cm (oder ein anderer noch festzulegender Wert) ergibt. Wenn nötig, ist zu interpolieren.

(Nach DIN 45 573 Teil 1, Abs. 2.5.)

The author discusses the reasons which guide to errors when measuring the transmission factor of microphones in the range of lower frequencies. He proposes to state the frequency response of the transmission factor and the directional pattern for a measuring distance for free field.

L'auteur discute les causes d'erreurs mesure lors de la mesure du facteur de transmission de microphones dans un régime de basses fréquences. Il propose de donner la caractéristique de fréquence du facteur de transmission et la caractéristique de directivité pour un mesure pour champ libre.