

Vortrag, gehalten auf der 13. Tonmeistertagung 1984, überarbeitet

In diesem Aufsatz werden allgemeine Merkmale von Kondensator-Druckempfängern erläutert, und die besondere Konstruktion der SCHOEPS-Kapsel MK 2 S wird erklärt. Da der Druckstau eine wichtige Rolle spielt, wird seine Betrachtung bis zur Grenzflächentechnik erweitert und deren grundlegende Funktion verständlich gemacht.

Aufstellung von Druckempfängern

Im Hinblick auf die Aufnahmetechnik müssen die Vor- und Nachteile von Druckempfängern in Relation zu Druckgradientenempfängern betrachtet werden. Theoretisch muss man Mikrofone mit Kugelcharakteristik nur um den Abstandsfaktor $\sqrt{3}$ näher an der Schallquelle aufstellen, um die gleiche Hallbalance zu erzielen wie mit einer Niere. Dann ist das Verhältnis von direktem und diffusem Schall für Kugel und Niere gleich. In der Praxis sind die Verhältnisse aber komplexer. Die Abstandsfaktoren werden unter der Annahme von Kugelschallquellen und Beschallung auf der Hauptachse des Mikrofons errechnet.

Sofern sie für ein einzelnes Instrument noch gelten, werden die Verhältnisse bei der Aufnahme größerer Instrumentengruppen oder gar eines Orchesters mehrdeutig. Da keine Punktschallquelle mehr vorliegt, lassen sich auch keine festen Abstände und Schalleinfallswinkel mehr angeben. Außerdem ist die Perspektive für ein näher aufgestelltes Kugelmikrofon eine andere als die einer entfernteren Niere (Abb. 1). Die Abstandsverhältnisse zu den Schallquellen sind unterschiedlich.

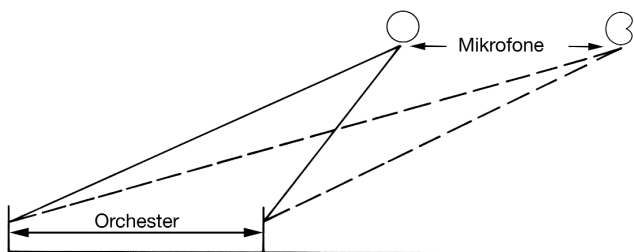


Abb. 1
Verschiedene Perspektiven unterschiedlich aufgestellter Mikrofone

Es wird hier keine Wertung der einen oder anderen Aufnahmetechnik mit Kugeln oder Nieren erfolgen, aber es soll klar werden, dass Nieren nicht einfach durch Kugeln ersetzt werden können, wie manchmal unterstellt wird. Beide Mikrontypen und Aufnahmetechniken haben Vor- und Nachteile, die von Könnern jeweils zu ihrem Besten genutzt werden.

Tiefenfrequenzgang bei Druck- und Druckgradientenempfängern

Ein wesentlicher Vorteil elektrostatischer Druckempfänger ist ihr konstanter Frequenzgang bei tiefen Frequenzen. Da die Ausgangsspannung von Kondensatorwandlern proportional zur Membran-Auslenkung ist, gibt es im Prinzip keine untere Grenzfrequenz.

Druckgradientenempfänger haben dagegen naturbedingt einen Tiefenabfall, der unterhalb 100Hz nennenswert ist, wenn das Mikrofon einige Meter von der Schallquelle entfernt steht. Dann ergibt sich nämlich kein Nahheitseffekt, der bei dichter Aufstellung tiefe Frequenzen anheben würde.

Die tatsächliche Schwächung der Übertragung tiefer Töne von Druckgradientenempfängern geht aus den Prospektblättern von Mikrofonen meist nicht hervor, da sowohl die üblichen Messabstände, als auch ein besonderer Effekt schalltoter Räume (Kanaleffekt) eine Tiefenanhebung bewirken (/1/, /2/ in Aufsatz 6).

Merkmale von Druckempfängern

Bei den immer besser gewordenen Möglichkeiten, selbst tiefste Frequenzen aufzunehmen und – entsprechende Räume vorausgesetzt – wiederzugeben, hat das Kondensatormikrofon mit Kugelcharakteristik an Bedeutung gewonnen. Probleme mit Stereoaufnahmen schwacher Korrelation, wie sie durch die Aufnahmetechniken mit Kugeln leichter entstehen (AB, siehe Aufsatz 3), haben gleichzeitig teilweise ihre Schrecken verloren, z.B. weil weniger Schallplatten produziert werden, die nicht geschnitten werden können, wenn Gegenphasigkeit der Kanäle bei tiefen Frequenzen vorliegt.

Während elektrostatische Druckempfänger bei den tiefen Frequenzen perfekt sein können, liegen ihre Probleme bei den Höhen. Die kugelförmige Richtcharakteristik bleibt bei hohen Frequenzen, bei denen das Mikrofon nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge ist, nicht erhalten (siehe auch Aufsatz 1). Das Mikrofon weist eine mehr oder minder ausgeprägte Richtwirkung auf. Dadurch werden hohe Frequenzen bei schrägem Schalleinfall und im diffusen Schallfeld weniger stark übertragen als bei axialer Beschallung (siehe Richtdiagramm in Abb. 2).

Aus den Erfordernissen der akustischen Messtechnik abgeleitet, gibt es daher zwei Grundtypen von Druckempfängern für die beiden Extremfälle des Schallfelds: den Freifeld- und den Diffusfeldtyp. Sie sind für den gerichteten Gebrauch im Nahfeld bzw. für die Anwendung weit außerhalb des Hallradius' geeignet.

Den Frequenzgang des so genannten Freifeldtyps zeigt Abb. 2 (MK 2). Der Frequenzgang in Richtung der Mikrofonachse ist sehr konstant, aber für schrägwinkligen Schalleinfall und im diffusen Schallfeld ergibt sich

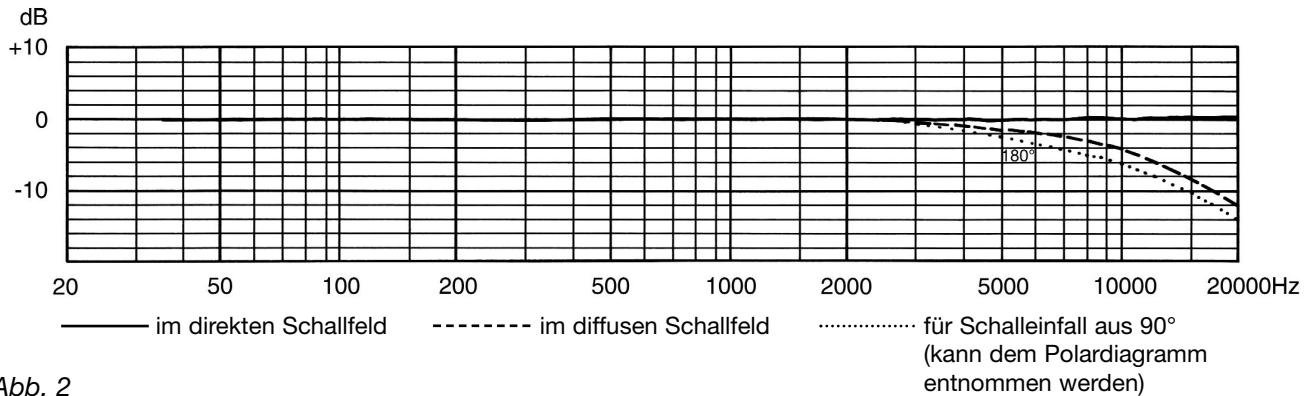


Abb. 2
Frequenzgänge der Freifeld-Kugel MK 2

Richtdiagramm für die Druckempfänger
MK 2 (Freifeldtyp) und MK 3 (Diffusfeldtyp)
Es ist für beide identisch.

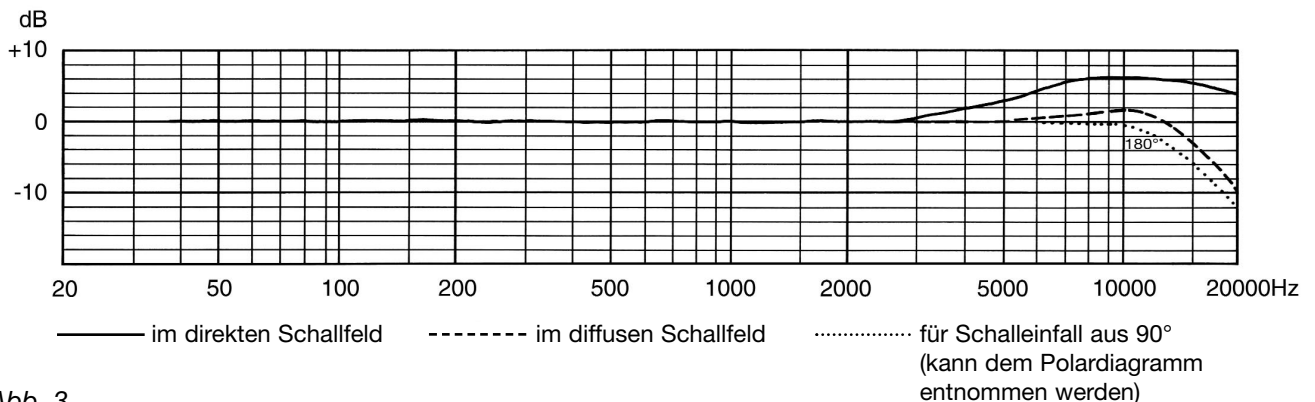
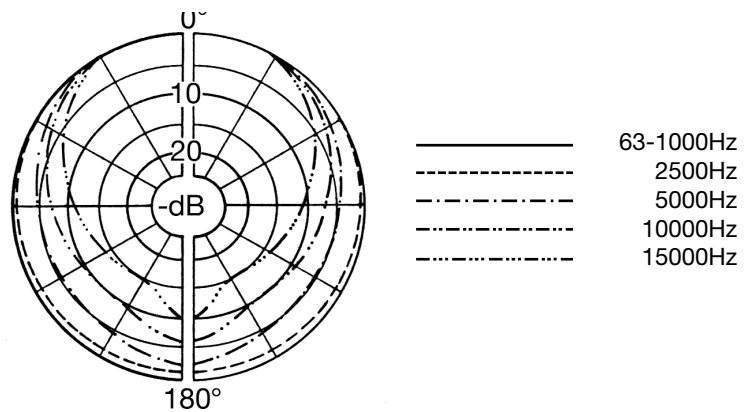


Abb. 3
Frequenzgänge der Diffusfeld-Kugel MK 3

ein Höhenabfall. Der Frequenzgang des Diffusfeldtyps (MK 3, Abb. 3) ist dagegen im diffusen Schallfeld weitgehend konstant, während Beschallung in Richtung der Mikrofonachse eine Höhenanhebung bringt.

Anforderungen an einen neuen Druckempfänger

In der vergangenen Zeit wurden recht viele Anwendungen – vor allem bei klassischer Musik – bekannt, bei denen mit nur zwei oder drei Kugeln ein ganzer Klangkörper aufgenommen wurde. Die Aufstellung der Mikrofone erfolgt dabei notwendigerweise meist

in Abständen, für die weder die Freifeld- noch die Diffusfeld-Kugel ideal sind. Der am besten geeignete Frequenzgang ist aber nicht einfach abschätzbar, da er immer von den individuellen räumlichen Gegebenheiten, vom aufzunehmenden Tonmaterial und auch physiologischen sowie subjektiven Kriterien abhängt. Daher wurde versucht, den erwünschten Frequenzgang möglichst praxisnah zu ermitteln.

Von einem Druckempfänger mit perfekt konstantem Frequenzgang ausgehend, wurden Anwender gebeten, ihren Wunschklang mit genügend fein einstellbaren Equalizern zu realisieren. Bei Richtmikrofonen wäre ein derartiges Vorgehen nicht sinnvoll, da viele Klangunterschiede durch die Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms begründet sein können und diese natürlich

nicht durch Equalizer beeinflussbar ist. Die Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms ist aber bei Druckempfängern gleicher Geometrie im wesentlichen vorgegeben, und um Mikrofone gleicher Abmessungen geht es hier. Phasendrehungen, die durch minimalphasige Equalizer hervorgerufen werden, ergeben sich in ähnlicher Weise auch im Wandler, wenn er akustisch verändert wird.

Das Ergebnis der Hörtests war überraschend eindeutig. Für zylindrische Mikrofone mit frontalem Schalleinfall und 20mm Durchmesser ergab sich ein Wunschfrequenzgang, der in Abb. 4 dargestellt ist.

fallsrichtung des Schalls und der Frequenz abhängen. Das senkrechte Auftreffen einer ebenen Welle auf einen würfelförmigen Körper führt in der Mitte der getroffenen Fläche beispielsweise zu einem Frequenzgang des Schalldrucks, wie er qualitativ in Abb. 5 dargestellt ist /1/, /2/.

Die Verhältnisse sind stilisiert, um den Einfluss der Größe eines reflektierenden Objekts zu verdeutlichen. Die Kurve ist zunächst nicht als Funktion der Frequenz dargestellt, sondern in Abhängigkeit vom Verhältnis der Seitenlänge des Würfels zu der Wellenlänge. Bei an-

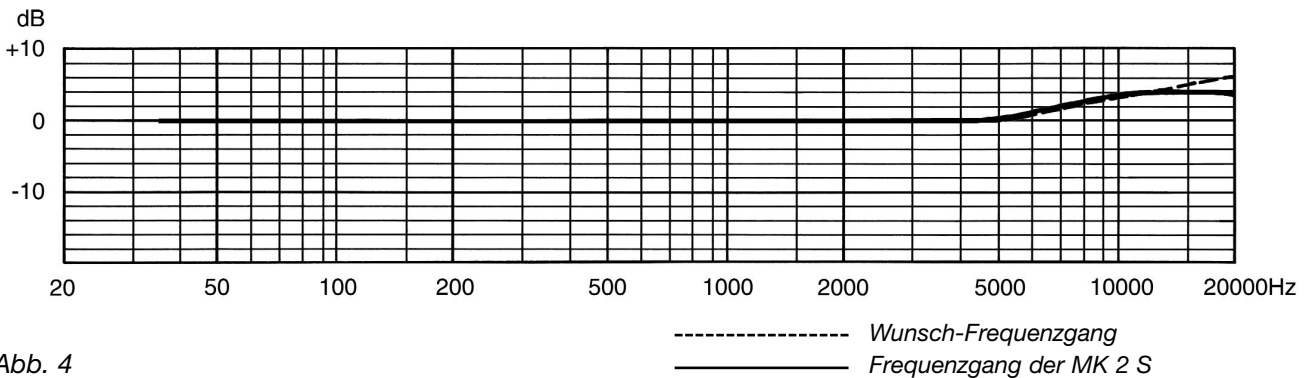


Abb. 4

Der Anstieg des Freifeldfrequenzgangs soll bei 5kHz beginnen. Bei logarithmischer Frequenzachse setzt er sich linear bis 20kHz fort und erreicht dort ca. +6dB.

Ein Vergleich zeigt, dass der Frequenzgang typischer Diffusfeldkugeln ähnlichen Durchmessers früher, also bei zu niedrigen Frequenzen, einsetzt und dass er bereits oberhalb 10kHz wieder abfällt.

Der Staudruck

Es ist nicht einfach, den Kurvenverlauf des Wunschfrequenzgangs zu erzielen. Der Buckel im Frequenzgang klassischer Diffusfeld-Druckempfänger mit dem anschließenden, unerwünschten Höhenabfall (Abb. 3) ist nämlich nicht nur durch die Lage der Systemresonanz zu erklären. Dieser Kurvenverlauf ergibt sich auch, wenn der Wandler – der Theorie entsprechend – sehr hoch abgestimmt wird, so dass seine mechanische Eingangsimpedanz im gesamten Übertragungsbereich eine Feder ist. Die Ursache liegt in dem Einfluss der Mikrofonkapsel auf das Schallfeld und dem dadurch zustande kommenden "Staudruck".

Objekte, die nicht klein gegenüber der Wellenlänge sind, beeinflussen nämlich das Schallfeld, indem sie Beugungen und Reflexionen verursachen. Dadurch kommt es zu Schalldruckänderungen, die von der Ein-

deren Körpern, wie z.B. Zylindern, ergibt sich ein ähnlicher Verlauf. Bei senkrechtem Schalleinfall auf die reflektierende Fläche ergibt sich der größte Druckanstieg. Daher die Bevorzugung axial auf das Mikrofon auftreffenden Schalls.

Für ein Mikrofon mit 34mm Durchmesser ergibt sich nach Umrechnung von L/λ die obere Frequenzachse in Abb. 5 (Abb. 5a). Da die akustische Wellenlänge von 10kHz in Luft ebenfalls 34mm beträgt, ergibt sich für diese Frequenz $L/\lambda=1$.

Die untere Frequenzachse hat dann Gültigkeit, wenn die Membran zentral in einer extrem großen Fläche liegt, wie das beim später zu besprechenden Grenzflächenmikrofon angenommen wird. $L/\lambda=1$ bei 10Hz bedeutet, dass die Abmessung L/λ – entsprechend der akustischen Wellenlänge dieser Frequenz – 34m groß sein muss!

Realisierung des Wunsch-Frequenzgangs

Um bei einer Mikrofonkapsel dem Frequenzgang von Abb. 5a entgegenzuwirken, so dass der erwünschte Verlauf von Abb. 4 erreicht wird, muss das Schwingungssystem in geeigneter Weise aufgebaut werden.

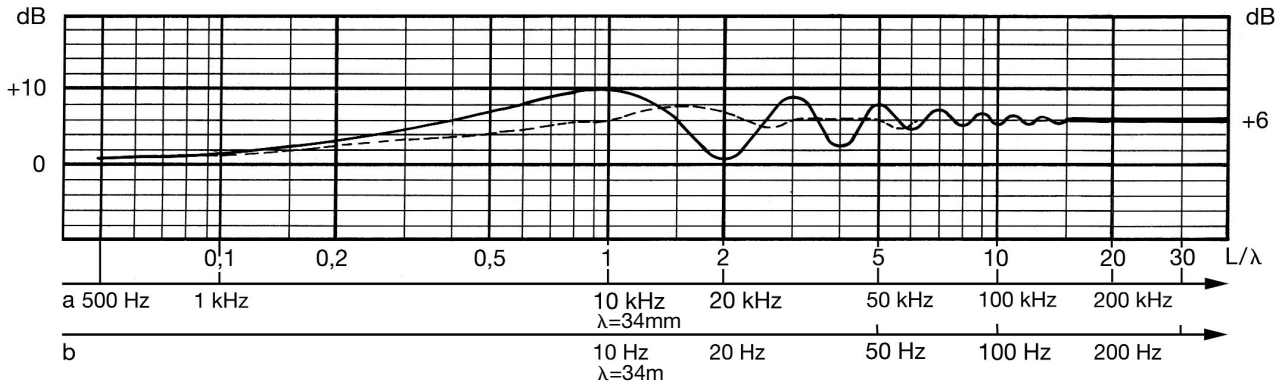


Abb. 5a,b

Typischer Frequenzgang des Schalldrucks in der Mitte eines reflektierenden Objekts

———— Schalleinfall aus 0°

- - - - - Schalleinfall aus ca. 60°

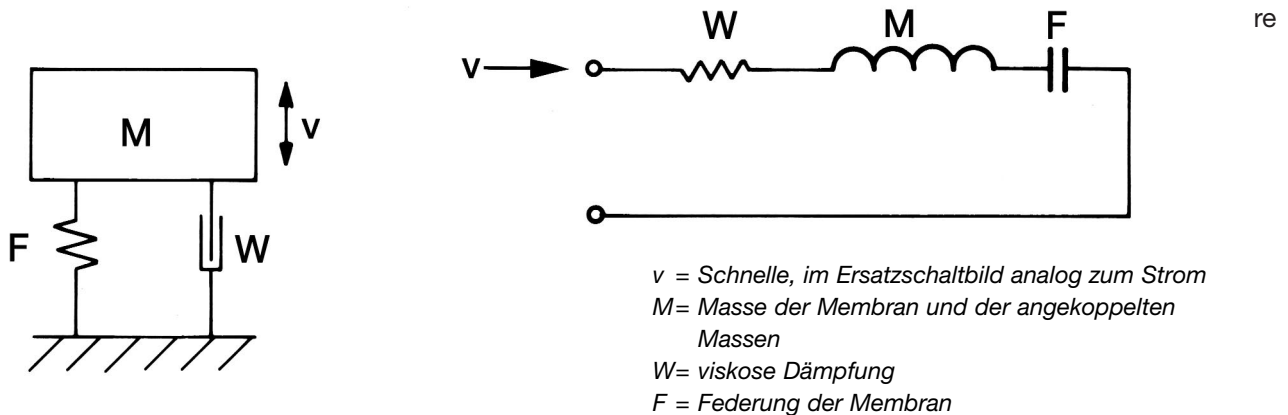


Abb. 6

Mechanisches System und elektrische Analogie eines elektrostatischen Druckempfängers

v = Schnelle, im Ersatzschaltbild analog zum Strom
 M = Masse der Membran und der angekoppelten Massen
 W = viskose Dämpfung
 F = Federung der Membran

Abb. 6 zeigt das einfachste Schwingungssystem eines Kondensatordruckempfängers und eine elektrische Analogie. Einem höheren Strom entspricht hier bei gegebener Frequenz eine höhere Empfindlichkeit.

Eine oberhalb des "Staudruckbuckels" liegende Resonanzfrequenz kommt der Wandlertheorie entgegen, aber die hohe Impedanz im darunter liegenden Übertragungsbereich bewirkt einen kleinen Übertragungsfaktor und damit in der Praxis einen schlechten Störspannungsabstand. Außerdem ergibt sich bei mittleren Frequenzen nicht der Wunschfrequenzgang.

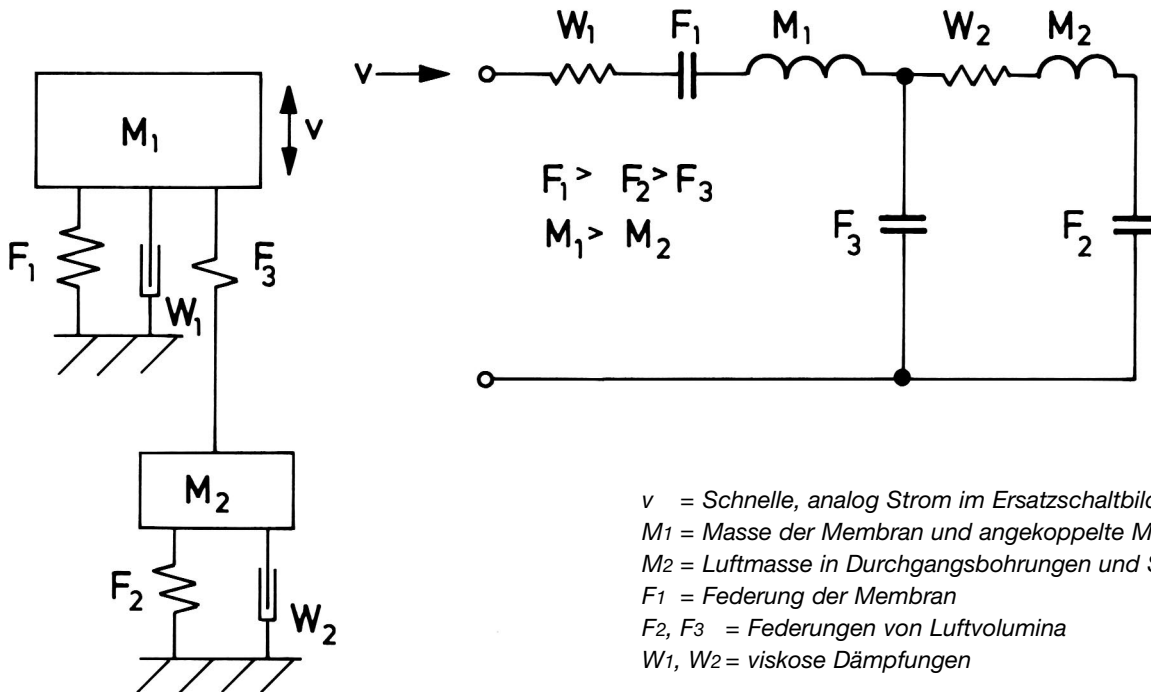
Abb. 7 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild der Kapsel MK 2 S. Durch den Nebenschluss des hochabgestimmten Kreises mit F_3 durch W_2 , M_2 , F_2 , ergibt sich ein hoher Betriebsübertragungsfaktor, und der Geräuschspannungsabstand hat einen der Digitaltechnik gerechtfertigten Wert. Ferner ist der Impedanzverlauf bei entsprechender Dimensionierung geeignet, den Frequenzgang in der erwünschten Form zu strecken. Erst oberhalb 16kHz wird die Steigung der Frequenzkurve leicht negativ (Abb. 4). Eine besondere

Detailarbeit, die den Frequenzgang ermöglicht, kann im Ersatzschaltbild jedoch nicht dargestellt werden. Sie steckt in der Nutzung der Effekte der Druckverteilung in Abhängigkeit vom Ort auf der Membran.

Weitgehend konstante Gruppenlaufzeit

Die Anhäufung von Reaktanzen im Schwingungssystem (Abb. 7) kann die Vermutung aufkommen lassen, dass der Phasengang negativ beeinflusst wird. Tatsächlich ist es jedoch durch geeignete Dimensionierung des dargestellten Minimumphasen-Netzwerks möglich, eine Linearität zu erreichen, die keine Nachteile gegenüber der reinen arctan-Funktion klassischer Konstruktionen wie Abb. 6 ergibt.

Der Phasengang wird in der Audiotechnik relativ selten diskutiert, und es gibt wohl aus diesem Grund auch manchmal falsche Vorstellungen darüber. Daher sei es



v = Schnelle, analog Strom im Ersatzschaltbild
 M_1 = Masse der Membran und angekoppelte Massen
 M_2 = Luftmasse in Durchgangsbohrungen und Spalt
 F_1 = Federung der Membran
 F_2, F_3 = Federungen von Luftvolumina
 W_1, W_2 = viskose Dämpfungen

Abb. 7
 Vereinfachtes mechanisches System und elektrische Analogie der Kapsel MK 2 S

erlaubt, hier darauf hinzuweisen, dass der ideale Phasengang linear mit der Frequenz wächst oder fällt und bei 0Hz immer Null ist!

Als anschauliches Beispiel kann eine kurze Schallwegstrecke dienen, die ohne Zweifel keine Veränderung der Kurvenform bzw. des Klangs eines Schallereignisses zur Folge hat. Für bestimmte Frequenzen entspricht diese Wegstrecke der halben Wellenlänge bzw. einer 180°-Phasenverschiebung. Bei der doppelten Frequenz passt dann aber schon eine ganze Wellenlänge, entsprechend 360°, in die gleiche Wegstrecke. Die absolute Größe des Phasenwinkels spielt also keine Rolle. Nur die Ableitung nach der Frequenz, die so genannte Gruppenlaufzeit, muss konstant sein ($\tau = d\varphi/d\omega = \text{konst.}$).

Das Polardiagramm bei hohen Frequenzen

Auch die MK 2 S bevorzugt bei hohen Frequenzen axial einfallenden Schall. Dies kann nützlich sein. Die Richtwirkung verursacht bei einer AB-Stereoanordnung, deren Mikrofone auseinander gerichtet werden, auf diese Weise zusätzlich zum Laufzeitunterschied einen Pegelunterschied zwischen den Kanälen. Es gibt Anwender, die so eine Verbesserung der Lokalisationschwäche der AB-Technik herbeiführen.

Dennoch bleibt der Wunsch nach einem Mikrofon,

dessen Polardiagramm auch noch bei hohen Frequenzen eine Kugel ist und dessen Frequenzkurven im freien und diffusen Schallfeld deshalb nicht divergieren.

Die übliche Abhilfe gegen das nicht ideale Richtdiagramm bei hohen Frequenzen ist der Bau kleinerer Mikrofone, aber diesem Lösungsweg sind leider Grenzen gesetzt: Kleinere Membranen führen auf Grund verschiedener Ursachen zu kleineren Betriebsübertragungsfaktoren (Empfindlichkeit), was wiederum eine Verschlechterung des Störspannungsabstands nach sich zieht. So ist es kein Zufall, dass heute praktisch alle zylindrischen Mikrofone, die ohne Einschränkung im Studiobetrieb verwendet werden können, wenigstens 16mm Durchmesser haben. Die Mehrheit dieser Mikrofone hat Durchmesser um 20mm.

Der Druckempfänger als Grenzflächenmikrofon

Es gibt aber noch einen anderen Lösungsweg, um einen Druckempfänger mit einem frequenzunabhängigeren Richtdiagramm zu bauen. Wir wissen, dass die Abweichungen vom kugelförmigen Richtdiagramm vom Durchmesser der Membran und von der Größe und Form des Mikrofongehäuses abhängen. Ist die Membran klein gegenüber der Wellenlänge, und bauen Beugung und Reflexionen am Gehäuse keinen frequenz- und richtungsabhängigen Staudruck auf, ist das Richt-

diagramm stets eine ideale Kugel.

Statt nun das Mikrofon besonders klein zu bauen, kann man auch versuchen, den Mikrofongörper sehr viel größer als die Wellenlänge zu machen. In Abb. 5 verschieben sich damit die Unebenheiten des Druckanstiegs am Mikrofongörper zu tiefen Frequenzen und spielen keine Rolle mehr, wenn sie in den nicht übertragenen Infrashallbereich fallen (Abb. 5b). Im Übertragungsbereich ergibt sich dann ein Schalldruckanstieg von +6dB, wie allgemein bei totaler Schallreflexion.

Da die Kurven des Druckanstiegs in Abb. 5 bei einem hohen Verhältnis von L/λ weniger vom Schalleinfallswinkel abhängen, wird auch das Richtdiagramm unabhängiger von der Frequenz.

Die notwendige Größe eines derartigen Mikrofongörpers errechnet sich leicht zu mehreren Metern. Daher entwickelte man Wandler, die sehr flach sind, so dass sie beim Aufbringen auf vorhandene große, ebene Flächen praktisch als Bestandteil dieser Fläche angesehen werden können. Auf den Fußboden gelegt, ist der Betrieb am einfachsten.

Während die Schallreflexion tiefer Frequenzen durch Fußböden oder Wände meistens ausreichend gewährleistet ist, muss für mittlere und hohe Frequenzen ein Reflektor vorgesehen werden. Dazu integriert man den

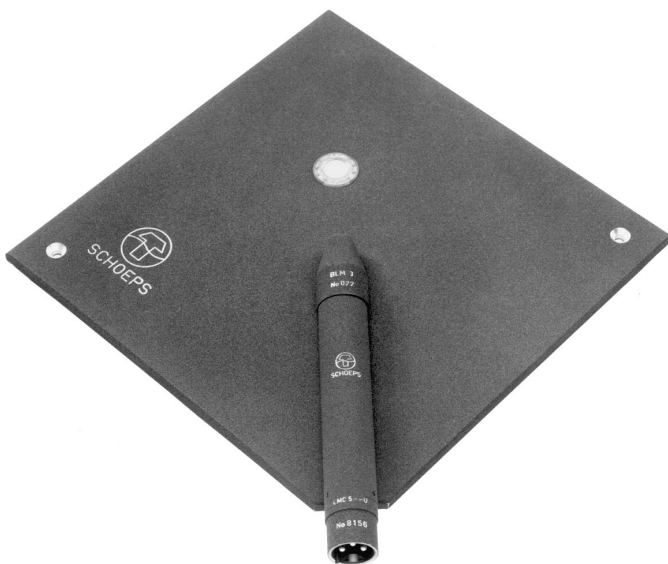


Abb. 8
Grenzflächenmikrofon BLM 53 U

Wandler in eine schallharte Platte (Abb. 8). Derartige so genannte Grenzflächenmikrofone sollten nicht auf einem Stativ betrieben werden, da sonst die Welligkeit der Druckverstärkung entsprechend Abb. 5 mitten in den Übertragungsbereich fällt. Der Wegfall von Stativen ist darüber hinaus oft ein beachtlicher Praxisvorteil.

Bei richtigem Einsatz auf großen schallreflektieren-

den Flächen ist das Richtdiagramm halbkugelförmig und weitgehend frequenzunabhängig. Im Gegensatz zu klassischen Druckempfängern ist daher keine Ausrichtung des Mikrofons auf die Schallquelle erforderlich. Auch bei hohen Frequenzen gibt es kaum Bündelung, und die damit zusammenhängenden Vorteile können vielen Anwendern neue Aspekte eröffnen.

Natürlich sollen die Schallquelle und ein beispielsweise am Boden liegendes Mikrofon nicht durch Hindernisse getrennt werden. Die "Sicht" ist erforderlich, um nicht hohe Frequenzen, die nicht um das Hindernis herum gebeugt werden, abzuschatten.

In der Praxis kann es deshalb erforderlich werden, Grenzflächenmikrofone auf schallreflektierenden Platten zu montieren. Das Ideal einer einige zehn Meter großen reflektierenden Fläche muss dann natürlich aufgegeben werden. In der Praxis haben sich Platten mit mindestens 1 m² Fläche bewährt. Die Platten dürfen selbst nicht schwingen bzw. resonieren. Dicke Plexiglasscheiben z.B. sind geeignet. Außerdem soll das Mikrofon nicht genau in der Mitte der Platte montiert werden, und diese soll nicht rund sein, damit die akustischen Effekte am Rand nicht alle nach gleicher Laufzeit auf das Mikrofon wirken. Das hätte einen besonders deutlichen Einfluss auf den Frequenzgang.

Bei Aufnahmen von Sprache ist oft auch ein (möglichst schallharter) Tisch geeignet, um sehr zufriedenstellende Aufnahmen aller Personen am Tisch zu erzielen. In diesem Fall ist die Größe der Tischplatte weniger kritisch, weil Sprache keine besonders tiefen Frequenzen enthält und die Unebenheiten des Frequenzgangs im untersten Frequenzbereich ohnedies oft durch die raumakustischen Effekte verdeckt werden. Sollte es ausnahmsweise zu einer unerwünschten Addition von stehenden Wellen kommen, kann ein anderer Aufstellungsort oder Absenken der tiefen Frequenzen helfen.

Literaturverzeichnis:

1. Müller, Black, Davis, Bell Telephone, 1937
2. H.F. Olson, Acoustical Engineering, D. Van Nostrand Company Inc., London, New York, 1957, S. 20 - 21