

Vortrag, gehalten auf der 19. Tonmeistertagung 1996.

Der Aufsatz erklärt zunächst Grundlagen der Signalverarbeitung. Dann wird dem theoretisch idealen Mikrofon das reale Mikrofon gegenübergestellt, das durch seine Fehler in bestimmten Fällen Vorteile bei der Anwendung bieten kann. Abschließend wird ein neuer Gedanke beschrieben, wie ein Mikrofon an alle Wünsche angepasst werden kann. Das patentierte System wurde weiterentwickelt und auf der Tonmeistertagung 1998 vorgestellt /8/.

## Bedingungen für universelle Übertragungselemente

Damit ein Übertragungselement universell eingesetzt werden kann, muss es Signale unverändert übertragen. Ein universelles Mikrofon muss also ein akustisches Ereignis in ein äquivalentes elektrisches Signal wandeln (Abb. 1a). Nachrichtentechniker sprechen von einer "verzerrungsfreien" oder auch "bildgetreuen" Übertragung.

Die Bedingungen für verzerrungsfreie Übertragung sind konstanter Amplitudenfrequenzgang und linearer

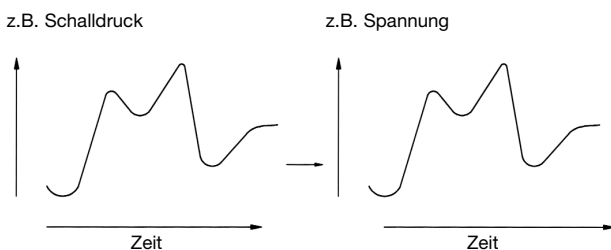


Abb. 1a  
Bildgetreue, verzerrungsfreie Übertragung eines Zeitvorgangs

Phasengang (Abb. 1b) /1/, /2/. Durch diese beiden Parameter kann ein Signal bzw. dessen Zeitverlauf eindeutig beschrieben werden. Es wird nichts anderes übertragen, keine dritte oder vierte Dimension oder gar Magie, wie mancher HiFi-Freak zu glauben scheint.

Es kann daher auch irreführend sein, wenn Hersteller durch die alleinige Angabe von Zeitfunktionen den Eindruck erwecken, sie wären der Zeit voraus. Es ist lediglich so, dass bei bestimmten Messungen, wie z.B. von Einschwing- oder Impulsverhalten, die Zeitfunktion zur Betrachtung besser geeignet ist.

Während die Forderung nach konstantem Frequenzgang einleuchtet, ist der lineare Phasengang eher er-

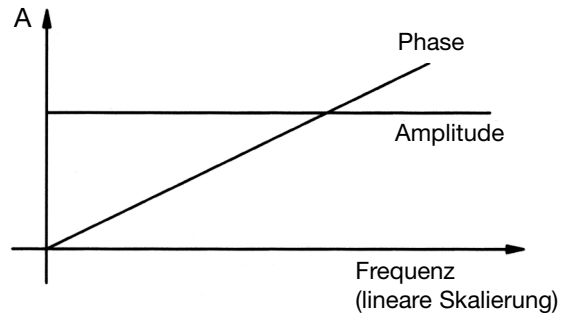


Abb. 1b  
Bedingungen für verzerrungsfreie Übertragung

klärungsbedürftig. Es gibt Toningenieure, die vom idealen Phasengang erwarten, dass er so konstant verläuft wie der Amplitudenfrequenzgang. Das trifft nicht zu.

Zunächst muss die Phase bei 0° beginnen, denn der Grenzfall tiefster Frequenzen endet bei 0Hz, also Gleich-Verhältnissen. (Einen Phasenwinkel zwischen beispielsweise zwei Gleichspannungen gibt es nicht).

Im weiteren Verlauf ist ein beliebig großer Phasenwinkel bei gegebener Frequenz ohne Bedeutung, sofern er nur doppelt so groß ist bei doppelter Frequenz, dreimal so groß bei dreifacher, usw. Auch dies lässt sich anschaulich erklären:

Eine kurze Schallstrecke kann praktisch als ideales Übertragungselement betrachtet werden. Wenn man sich in einem ebenen Schallfeld ohne Einfluss von Reflexionen beispielsweise 17cm vor- oder zurückbewegt, so ändert sich das Klangbild praktisch nicht. Dennoch beträgt die Phase zwischen diesen beiden Punkten bei 1kHz eine halbe Wellenlänge, entsprechend 180° Phasenwinkel. Bei 2kHz passt zwischen die beiden Punkte aber bereits eine ganze Wellenlänge, es besteht also ein Phasenwinkel von 360°. Die Forderung linearer Zunahme des Phasenwinkels mit der Frequenz für verzerrungsfreie (bildgetreue) Abbildung ist erfüllt. (Die mathematische Ableitung der Phase nach der Frequenz ist die so genannte Gruppenlaufzeit; sie muss konstant sein:  $\tau = d\phi/d\omega = \text{konstant.}$ )

## Die Übertragungskette

Abb. 2 zeigt eine vollständige Übertragungskette, die mit einem Mikrofon beginnt. Die meisten Elemente dieser Kette werden universell eingesetzt.

Selbst Anwender, die ihre Ausrüstung besonders sorgfältig aussuchen und sogar Kabel philosophischen Betrachtungen unterziehen, produzieren und hören nach einmal erfolgter Wahl durchweg mit derselben

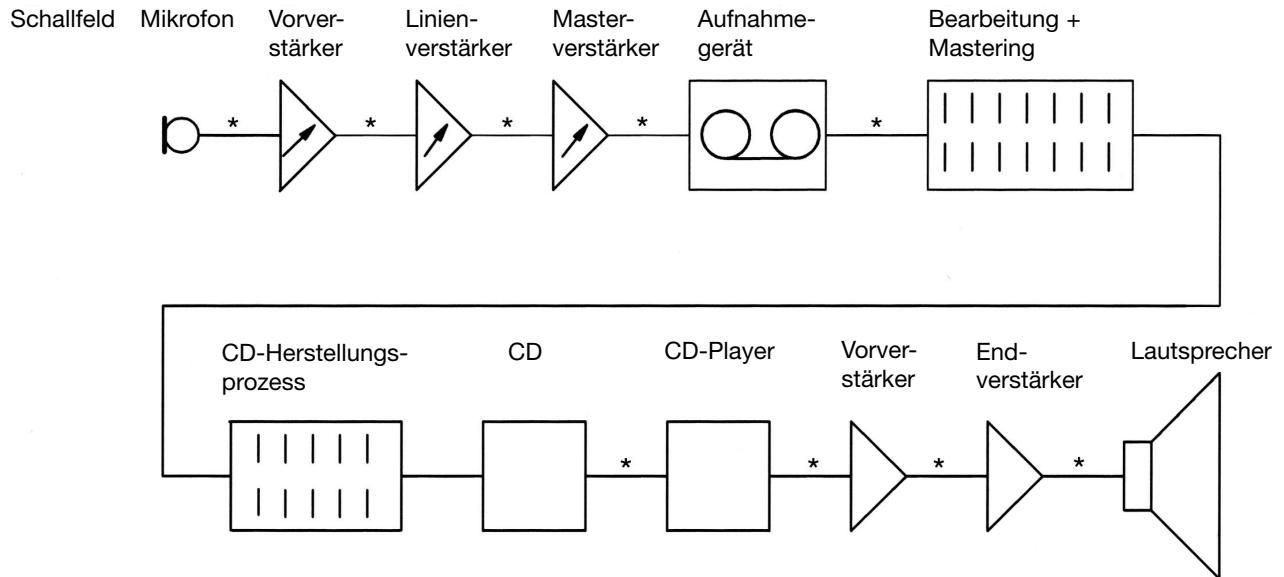


Abb. 2  
Beispiel einer Audio-Übertragungskette

\* Kabel

Anlage. Die Idee, für unterschiedliche Arten von Musik jeweils andere Aufnahmegereäte, Bandmaterial, Kabel usw. einzusetzen, wäre für Industrie und Wirtschaft gewiss reizvoll, aber sie wird sich nicht durchsetzen.

Wie kommt es dann, dass es Toningenieure gibt, die in bestimmten Fällen das Mikrofon in Abhängigkeit vom Instrument wählen? Sind Mikrofone weniger universell als andere Übertragungselemente?

## Unterschiede zwischen Wandlern und Vierpolen

Der wesentliche Unterschied zwischen Mikrofonen bzw. elektroakustischen Wandlern und den anderen Elementen einer Übertragungskette besteht darin, dass Wandler mit dem Schallfeld verknüpft sind, während elektrische Übertragungselemente einfach als Vierpole mit zwei Ein- und Ausgängen beschrieben werden können.

Durch das Schallfeld kommen Parameter ins Spiel, die es bei Vierpolen nicht gibt. Die wichtigste Funktion hat dabei das Richtdiagramm:

Erstens bedeutet eine Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms, dass der Frequenzgang je nach Einfallswinkel des Schalls anders aussieht /3/.

Zweitens nutzen alle richtenden Mikrofone den mit der Frequenz linear abnehmenden Druckgradienten, so dass tiefste Frequenzen von derartigen Wandlern stets etwas geschwächt übertragen werden /4/.

Der Tiefenabfall kann durch den Nahheitseffekt nur in Sonderfällen kompensiert werden. Die im Vergleich zu Druckempfängern (Kugeln) schwächere Tieftönübertragung der Druckgradientenempfänger wird dagegen noch durch den Vektorcharakter des Druckgradienten verschärft: Es können nur die Schnellekomponenten aus dem Schallfeld aufgenommen werden, die in Richtung der Hauptachse des Mikrofons liegen. (Die Schallschnelle ist proportional zum Druckgradienten.)

## Die existenten Mikrofone

Befürworter von Kondensatormikrofonen mit Kugelcharakteristik können sich durch die zuletzt gemachten Ausführungen bestätigt fühlen. Andererseits zeigen sogar Druckempfänger mit kleinem Durchmesser bei hohen Frequenzen eine immer noch beachtliche Abweichung von der idealen Kugelcharakteristik. Der Bedarf an mehreren verschiedenen Modellen (bei SCHOEPS derzeit vier Typen) ist damit zu erklären, dass man je nach den Komponenten des direkten und des diffusen Schallfelds am Aufnahmeort den jeweils geeigneten Typ wählen muss. Besonders universell sind diese Mikrofone also nicht.

Ein weiterer Nachteil von Kugeln zeigt sich in der Praxis: Aus verschiedenen Gründen kann man nicht immer so nahe an die Schallquelle herangehen, wie es beispielsweise die Hallbalance verlangt. Die Ausblendung von Störschall oder zu viel Raumanteilen an einem vorgegeben Ort ist auch nicht möglich. So ist die Richtwirkung von Mikrofonen eine sehr wünschenswerte Eigenschaft, die sich im wahrsten

Sinne des Wortes gezielt einsetzen lässt.

Bei kleinen Druckgradientenempfängern kann das Richtdiagramm im Vergleich zu Kugeln im Bereich mittlerer bis hoher Frequenzen eine bessere Konstanz aufweisen. Daraus erklären sich die recht universellen Einsatzmöglichkeiten kleiner Kondensatormikrofone mit den Richtcharakteristiken Breite Niere, Niere und Superniere.

Große Mikrofone weisen prinzipiell die stärkste Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms auf. Sie sind daher am wenigsten universell, können aber bei bestimmten Anwendungen durchaus Vorteile haben, wie später noch an einem Beispiel erklärt wird.

### Das Bündelungsmaß

Der Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms entsprechen, wie schon festgestellt, unterschiedliche Frequenzgänge für Schall aus verschiedenen Richtungen. Obwohl es sich durchaus lohnen kann, Frequenzgänge für verschiedene Schalleinfallswinkel zu untersuchen, ist das natürlich eine mühsame Angelegenheit. Eine übliche Vereinfachung besteht darin, neben der Frequenzgangmessung im schalltoten Raum auf der Achse des Mikrofons auch noch den Frequenzgang im diffusen Schallfeld zu ermitteln. Dies ist der gemittelte Frequenzgang über alle Richtungen.

Die Differenz der Frequenzgänge im direkten und im diffusen Schallfeld wird als Bündelungsmaß bezeichnet (ausgedrückt in dB). Sein Frequenzgang ist ein Hinweis darauf, wie sich die Richtwirkung in Abhängigkeit von der Frequenz ändert.

### Betrachtung von Mikrofonen unterschiedlichen Charakters

Die Abb. 3-5 zeigen Frequenzgänge im direkten und diffusen Schallfeld, sowie die des Bündelungsmaßes verschiedener Mikrofone, wie sie früher z.B. grundsätzlich in den Mikrofონкennblättern des IRT veröffentlicht wurden /5/. Folgende Aussagen lassen sich aus den Darstellungen ableiten:

Abb. 3a/b: Ihrer jeweiligen Bestimmung entsprechend (Freifeld/Diffusfeld), haben die beiden Kugeln unterschiedliche Frequenzgänge im direkten Schallfeld. Da sie weitgehend gleich aufgebaut sind, ist ihre Abweichung von der kugelförmigen Richtcharakteristik bei hohen Frequenzen jedoch gleich und damit auch der Verlauf ihrer Bündelungsmaße über der Frequenz. Der Klang dieser beiden Wandler könnte daher ohne großen Nachteil durch einen guten Equalizer in den des jeweils

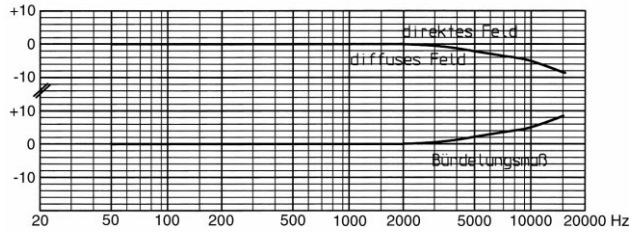


Abb. 3a Freifeldkugel

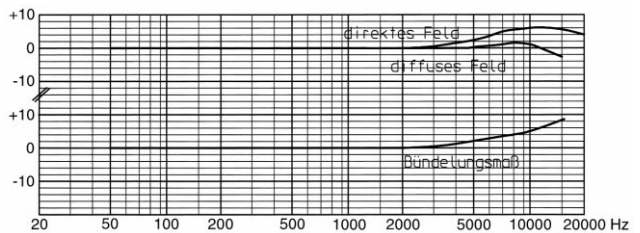


Abb. 3b Diffusfeldkugel

anderen überführt werden.

Wie Praktiker wissen, gelingt es sonst fast nie, den Klang eines Mikrofons durch Einsatz eines Equalizers in den eines anderen Modells zu ändern. Die Ursache liegt in der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit der Richtdiagramme verschiedener Mikrofone, auf die man natürlich mittels elektrischer Korrektur keinen Einfluss nehmen kann.

Abb. 4a/b: Die beiden Nieren haben den gleichen Frequenzgang im direkten Schallfeld. Bei nahen Schallquellen auf der Hauptachse der Mikrofone ist daher kein Unterschied hörbar, aber sobald die Mikrofone entfernter aufgestellt werden, gewinnt Schall aus allen

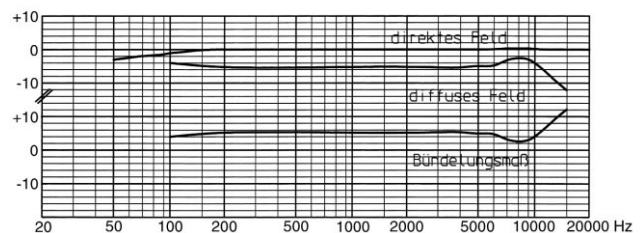


Abb. 4a Niere

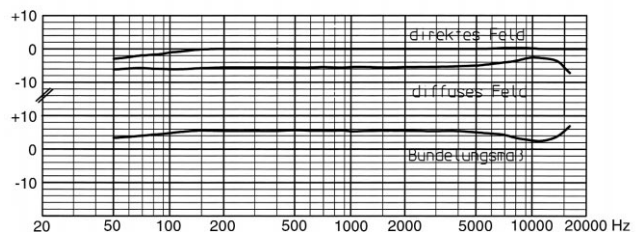


Abb. 4b Niere

anderen Richtungen an Einfluss, und der Unterschied macht sich bemerkbar.

Das Mikrofon der Abb. 4a wird bei großem Abstand zur Schallquelle ein mattes, etwas dumpfes Klangbild vermitteln, da der durch den Abstand erhöhte Diffusfeldanteil an Bedeutung gewinnt: Wie der Abbildung entnommen werden kann, überträgt dieses Mikrofon oberhalb 10kHz nur wenig Höhen aus dem diffusen Schallfeld.

Das Mikrofon in Abb. 4b hat auch im diffusen Schallfeld einen bemerkenswert konstanten Frequenzgang. Sein Richtdiagramm ist relativ wenig frequenzabhängig. Es wird auch bei größerem Abstand zur Schallquelle zufrieden stellen und ist recht universell einsetzbar. Ein derartiger Wandler ist gut geeignet für eine Nutzung z.B. im ORTF-Mikrofon. Es wird selten so nah aufgestellt, dass die reflektierten Schallanteile keine Rolle spielen.

Es ist unmöglich, die beiden Mikrofone mittels Equalizer klanglich gleich zu machen, da die Frequenzabhängigkeit ihrer Richtdiagramme dadurch unverändert bleibt.

Abb. 5 zeigt Frequenzgänge eines etwas exotischen Großmembran-Mikrofons, das nach grundsätzlichen

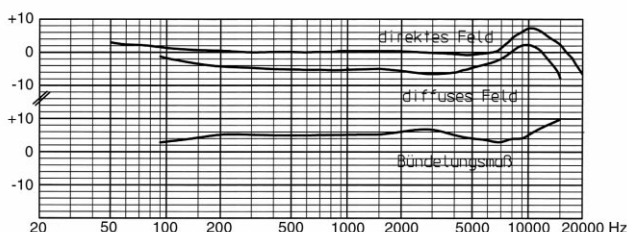


Abb. 5  
Großmembran-Mikrofon

Betrachtungen als unausgeglichene bezeichnet werden kann. Bei Frequenzen zwischen 5kHz bis 9kHz verliert dieses Mikrofon stark an Richtwirkung.

Beim Einsatz in einem bei hohen Frequenzen überbedämpften Sprecherstudio, kann die kugelhähnlichere Übertragungseigenschaft aber mehr von der schwachen Raumakustik übertragen und dadurch positiv bewertet werden. Die überzogenen Höhenfrequenzgänge tragen darüber hinaus dazu bei, dass der Klang bestimmt nicht "muffig" wirkt, selbst wenn das Studio so klingt, als ob man in ein Kopfkissen spricht.

Der stark vom Schalleinfallswinkel abhängende Frequenzgang spielt keine Rolle, da der Sprecher höchstwahrscheinlich auf der Mikrofonachse bleibt.

## Nutzung von Merkmalen nicht-idealer Wandler

Die beschriebenen Beispiele ließen sich fortsetzen und belegen einmal mehr, dass theoretische Schönheitsfehler in der Praxis nutzbringend eingesetzt werden können. Von einem wirklich universellen Mikrofon müsste man daher erwarten, dass es über die oben vorgenommene Definition eines "verzerrungsfreien" Übertragungselements hinaus auch gezielte Abweichungen davon ermöglicht.

So stellt sich die Frage, ob man nicht ein Mikrofon bauen kann, bei dem die Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms einstellbar ist. Damit wäre ein wahrlich universeller Einsatz möglich, bis hin zu Soundwünschen, die sonst nur durch spezielle Mikrofone erzielt werden können. Für den Anwender wäre damit der nützliche Nebeneffekt verbunden, dass er erkennt, welche Frequenzabhängigkeiten ihm erwünschte Effekte bringen. So kann er gezielt vorgehen und muss nicht die zufällig in Form von bestimmten Mikrofonen vorliegenden Merkmale suchen, die in aller Regel nicht hinreichend genau dokumentiert sind.

## Das universelle Mikrofon

Es gibt umschaltbare Mikrofone, deren Richtcharakteristik z.B. auf "Kugel", "Niere" und "Acht" eingestellt werden kann, wobei der Anwender glauben könnte, diese sei für den gesamten Frequenzbereich gültig. Das ist jedoch nicht der Fall.

Eine weitere Möglichkeit, die Richtcharakteristik zu verändern, ergibt sich mit dem so genannten "Straus-Paket". Das klassische Straus-Paket arbeitet mit einer Kugel und einer Niere. Abb. 6 zeigt eine erweiterte Anwendung mit Kugel und Superniere. Wenn man zwei



Abb. 6  
Straus-Paket



Kanäle mit diesen Signalen abmischt, kann man von Kugel, Breiter Niere, Niere bis Superniere beliebige Polardiagramme erhalten. Verwendet man anstelle der Superniere eine Acht, so kann die Palette der Richtcharakteristiken natürlich bis zur Acht erweitert werden. Auch in diesen Fällen ist die sich fast immer ergebende Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik rein zufällig.

Wenn man dagegen das Polardiagramm frequenzabhängig machen will, kann man gemäß eines neuen Vorschlags den Übertragungsbereich in verschiedene Frequenzbänder unterteilen und darin Summen mit unterschiedlichen Pegeln von Kugel und Acht bilden (Patent angemeldet /6/). So erzielt man ein Mikrofon, das es erlaubt, in verschiedenen Frequenzbändern absichtlich unterschiedliche Richtdiagramme einzustellen. Versuche haben ergeben, dass sich so tatsächlich die Klangbilder sehr verschiedener Mikrofone nachbilden lassen /7/.

Für eigene Versuche kann der Interessierte so vorgehen, dass er ein Straus-Paket nutzt und vor der Summenbildung den Frequenzgang im Kanal von Kugel und Niere verändert. Sofern der Gesamtfrequenzgang dabei unbeeinflusst bleiben soll, stellt man die Frequenzgänge beider Kanäle spiegelbildlich ein.

## Zusammenfassung

Mikrofone mit konstantem Frequenzgang und linearem Phasengang können sehr universell eingesetzt werden, wenn ihr Polardiagramm weitgehend frequenzunabhängig ist. Kleine Kondensatormikrofone erfüllen diese Bedingungen am ehesten.

Wenn das Richtdiagramm frequenzabhängig ist, kann dieser theoretische Fehler aber auch mit dem Nutzeffekt eingesetzt werden, bestimmten geschmacklichen Wünschen oder anwendungstechnischen Bedürfnissen näher zu kommen. Es wurde eine Technik vorgestellt, die es möglich macht, den Frequenzgang des Bündelungsmaßes eines Mikrofons einzustellen.

## Literaturverzeichnis:

1. K. Küpfmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1965, S. 480
2. A. Schaumberger, AES Convention Copenhagen, 1974
3. J. Wuttke, Mikrofondaten und ihre Bedeutung in der Praxis, in: Bericht zur 12. Tonmeistertagung 1981, Bildungswerk des Verbands Deutscher Tonmeister (Aufsatz Nr. 11 dieses Sammelbands)
4. J. Wuttke, Mikrofonen Allerlei – Kleines Kompendium, in: Bericht zur 18. Tonmeistertagung 1994, Bildungswerk des Verbands Deutscher Tonmeister (Aufsatz 6 dieses Sammelbands)
5. P. Buhler, Mikrofonkennblätter, IRT Hamburg, 1956 - 1974
6. J. Wuttke, SCHOEPS, Patentanmeldung P 44 36 272.2
7. R. Schnellbach, Untersuchungen an einem Mikrofonensystem mit frequenzabhängig variablem Bündelungsmaß, Diplomarbeit, 1995
8. Ch. Langen, Mikrofon mit frequenzabhängig einstellbarem Bündelungsmaß, in: Bericht zur 20. Tonmeistertagung 1998, Bildungswerk des Verbands Deutscher Tonmeister