

Vortrag, gehalten auf der 12. Tonmeistertagung 1981, überarbeitet

Unter der großen Anzahl wichtiger Mikrofondaten wird allgemein der Frequenzgang der Amplitude als besonders kennzeichnend angesehen. Ein einzelner Frequenzgang jedoch genügt nicht zur vollständigen Beschreibung eines Mikrofons. Z.B. führen verschiedene Schalleinfallswinkel meist zu unterschiedlichen Frequenzgängen. Zunächst soll daher das aufzunehmende Schallfeld betrachtet werden.

Das Schallfeld

Die Komponenten des natürlichen Schallfelds ohne Erstreflexionen sind in Abb. 1 dargestellt. Der zunächst in einem kleinen Bereich konzentrierte Schalldruck einer Schallquelle verteilt sich bei seiner Ausbreitung auf immer größere Raumteile. Die daraus resultierende Abnahme des Schalldruckpegels bei gleichartiger Ausbreitung in alle Richtungen – also Kugelwellen – ist in Abb. 1 dick gekennzeichnet. Der Schalldruck ist hier proportional zum Reziprokwert des Radius, nimmt also pro Abstandsverdopplung um 6dB ab.

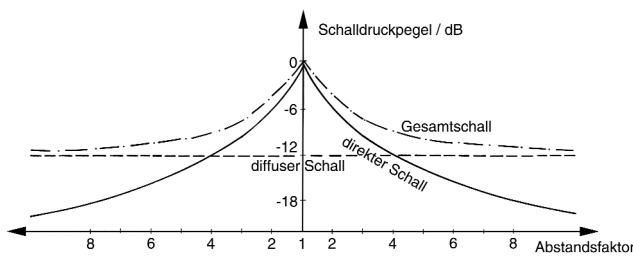


Abb. 1

Im schalltoten Raum gilt dies exakt. Sobald aber Reflexionen auftreten, addieren sich zum direkt von der Quelle herkommenden Schall Anteile aus anderen Richtungen. In Räumen wird der Schall an allen Wänden und Hindernissen reflektiert, so dass man sich schließlich eine Gleichverteilung über alle Richtungen vorstellen darf. Der Schall ist diffus.

Der diffuse Schalldruckpegel ist in Abb. 1 durch die gestrichelte horizontale Gerade dargestellt. Dieser Pegel liegt um so höher, je länger die Nachhallzeit des Raums ist. Die Leistungsaddition von direktem und reflektiertem Schall ergibt den Gesamtschalldruck am jeweiligen Ort.

Um abzuschätzen, ob ein Mikrofon mehr im direkten oder im diffusen Schallfeld platziert ist, muss man den Hallradius kennen; dies ist der Bereich, innerhalb dessen der direkte Schallpegel höher ist als der diffuse. Der Hallradius eines Raums lässt sich berechnen. Er ist proportional zur Wurzel aus dem Quotienten von

Volumen und Nachhallzeit. Das Volumen nimmt dabei wegen seines kubischen Charakters die wichtigere Rolle ein. Zwischen dem Volumen eines kleinen Raums und dem eines großen Saals besteht leicht ein Faktor von mehr als 100. Aus einer kurzen Nachhallzeit wird aber schon nach Multiplikation mit 10 eine lange Nachhallzeit. Daher sind die Hallradien in kleinen Räumen, wie dies leider in der Regel auch Abhörräume sind, meist überraschend klein, z.B. weniger als 1m. In guten Konzertsälen betragen sie oft 4 bis 6m.

Der Frequenzgang

Nur bei Einsatz des Mikrofons innerhalb des Hallradius' und korrekter Ausrichtung auf die Schallquelle gilt die Frequenzkurve des Datenblatts. Sie wird im schalltoten Raum und bei Beschallung allein in Richtung der Hauptachse des Mikrofons gemessen. Für schrägwinkligen Schalleinfall ergeben sich meist andere Frequenzgänge. Die Frequenzkurve im diffusen Schallfeld kann daher ebenfalls ganz anders aussehen. Dies ist auch die wichtigste Erklärung dafür, warum Mikrofone mit – laut Datenblatt – gleichem Frequenzgang sehr unterschiedlich klingen können.

Der Frequenzgang im diffusen Schallfeld resultiert aus der Summe der verschiedenen Frequenzgänge für Schalleinfall aus allen Richtungen. Er ist von umso größerem Einfluss, je weiter entfernt von der Schallquelle ein Mikrofon in einem Raum aufgestellt wird.

Andererseits gibt es auch Gründe, die den Frequenzgang im direkten Schallfeld vorrangig erscheinen lassen. So formt der direkte Schallanteil, auch wenn er kleiner ist als der diffuse, stets die erste Wellenfront und liefert damit u.a. die Richtungsinformation. Außerdem erhöhen sich Anteil und Bedeutung des direkten Schalls dadurch, dass viele Schallquellen gerichtet abstrahlen und dass Mikrofone mit ausgeprägter Richtcharakteristik (z.B. Niere) eingesetzt werden. Statt des Hallradius' gilt dann der so genannte effektive Hallradius, der besagt, ab welcher Distanz der diffuse Schallanteil größer ist als der direkte. Der effektive Hallradius ist oft um den Faktor 2 bis 3 größer und wächst mit der Frequenz, wenn Reflexionen und Nachhallzeit abnehmen.

Das Richtdiagramm und sein Einfluss

Wie sieht der Frequenzgang im diffusen Schallfeld nun aus? Er wird allgemein nur mittelbar durch das Richtdiagramm bei verschiedenen Frequenzen ausgewiesen und findet deshalb nur wenig Beachtung.

Als erstes Beispiel betrachten wir einen Druckempfänger, also ein Mikrofon mit Kugelcharakteristik. Es liegt in der Natur dieser Mikrofone, dass sie bei höhe-

ren Frequenzen ihre konstante Empfindlichkeit für Schall aus allen Richtungen verlieren und mehr oder minder gerichtet empfangen. Das Richtdiagramm in Abb. 2 verdeutlicht dies und zeigt, dass Schall, der z.B. aus 180°, also von hinten auf das Mikrofon fällt, bei 10kHz um 6dB geschwächt gegenüber dem durch die Frequenzkurve ausgewiesenen Pegel aufgenommen wird. Wenn man die Pegelveränderung bei weiteren Frequenzen für die gleiche Schalleinfallrichtung aus dem Polardiagramm in das Frequenzgangdiagramm überträgt, erhält man den kompletten Frequenzgang für Schalleinfall aus der gewählten Richtung.

Der diffuse Schall beinhaltet Schalleinfall aus allen Richtungen, so dass der entsprechende Frequenzgang in diesem Fall zwischen der 0°- und der 180°-Kurve liegt. Unter der meist zutreffenden Annahme, dass die Richtcharakteristik rotationssymmetrisch ist, kann man den Frequenzgang im diffusen Schallfeld durch grafisches Integrieren ermitteln, entsprechend der Definition des Bündelungsgrads (DIN 45591).

Der zu hohen Frequenzen hin fallende Frequenzgang im diffusen Schallfeld soll hier als Beispiel dienen, wie trügerisch die Betrachtung eines einzelnen Frequenz-

gangs sein kann. Das in Abb. 2 dargestellte – für Nahfeldeinsatz zweifellos hervorragende – Mikrofon würde in größerer Entfernung und überwiegend diffusem Schallanteil ein dumpfes Klangbild liefern. Bei Druckempfängern höchster Qualität – wie bei Messmikrofonen – unterscheidet man daher meist zwischen solchen für den direkten Schall (Freifeldtypen) und den für diffusen Schall. Letztere weisen eine Frequenzgangüberhöhung im direkten Schallfeld auf, die den durch das frequenzabhängige Richtdiagramm bedingten Höhenverlust im diffusen Schallfeld kompensiert (Abb. 3). Beim bestimmungsgemäßen Einsatz eines diffusfeldentzerrten Mikrofonen – also in großem Abstand zur Schallquelle – bekommt man daher nicht den Eindruck einer Höhenanhebung.

Andere Mikrofone, die prinzipbedingt ein besonders frequenzabhängiges Richtdiagramm haben und daher im diffusen Schallfeld anders reagieren, als es die üblicherweise veröffentlichte Frequenzkurve zeigt, sind die Interferenzrohr-Richtmikrofone. Da sie – ihrem Einsatzzweck entsprechend – weit von der Schallquelle eingesetzt werden, der diffuse Schallanteil also relativ groß ist, und andererseits der direkte Schall bevorzugt aufgenommen werden soll, ist bei ihnen nur ein Kompromiss zwischen gutem Freifeld- oder Diffusfeldfrequenzgang möglich.

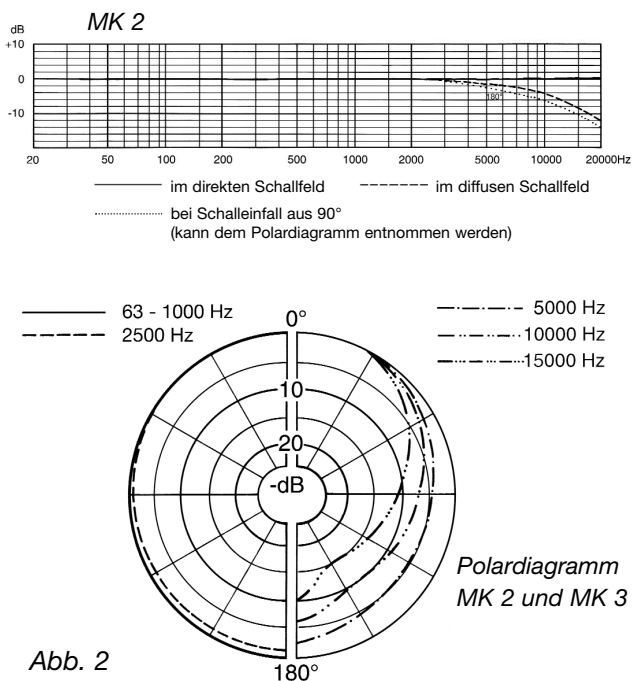


Abb. 2

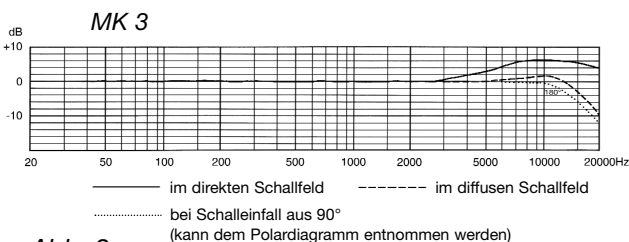


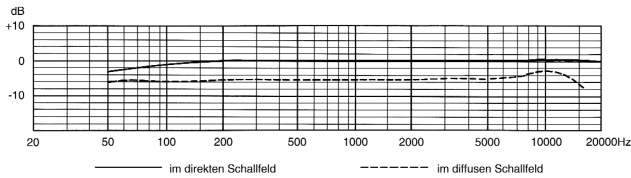
Abb. 3

Die Nutzung des Richtdiagramms

Druckgradientenempfänger wie Niere und Hypernieren bieten Möglichkeiten, dem Ideal eines Mikrofons nahe zu kommen, dessen Frequenzgänge im direkten und diffusen Schallfeld sehr ähnlich sind, obwohl es diesbezüglich nennenswerte Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen des Markts gibt. Abb. 4 und 5 zeigen die Frequenzgänge hochwertiger Kondensatormikrofone mit Nieren- und Supernierencharakteristik. Die Diffusfeldkurven liegen um das Bündelungsmaß unter den Kurven für den direkten Schalleinfall in Richtung der Hauptachse des Mikrofonen.

Dies hat große Bedeutung im Hinblick auf die Vermeidung von akustischen Rückkopplungen. Der sie auslösende Schall der Lautsprecher wird mit einer um das Bündelungsmaß reduzierten Empfindlichkeit aufgenommen, wenn die Lautsprecher weiter vom Mikrofon entfernt sind als es dem Hallradius des Raums entspricht. Nur im Falle einer näheren Aufstellung – z.B. bei Bühnenmonitoren – spielt die Ausrichtung der Mikrofone zum nächsten Lautsprecher eine dominierende Rolle. Dann muss das Mikrofon mit seinem Empfindlichkeitsminimum zum Lautsprecher weisen.

So wie der Frequenzgang in der Praxis häufig von der Art des Schallfelds abhängt, verliert auch das Richtdiagramm an Bedeutung, wenn der diffuse Schall zunimmt. Das Richtdiagramm gilt nur für den direkten Schall. In den diffusen Anteilen eines natürlichen Schallfelds gibt es keine Vorzugsrichtung. Daher lässt die



MK 4

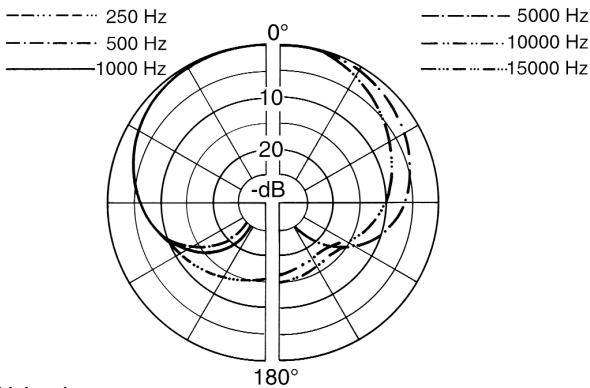
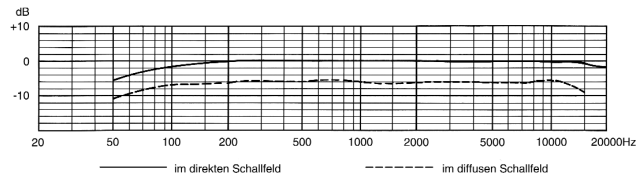


Abb. 4



MK 41

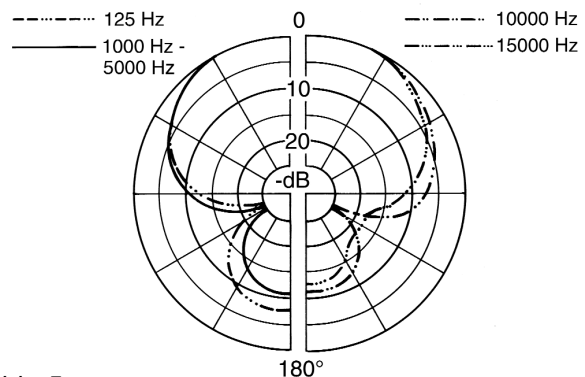


Abb. 5

“Schärfe” der Richtwirkung in Räumen mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle nach, bis sie im Extremfall nicht mehr feststellbar ist.

Die Vorstellung, dass Richtmikrofone Schall, der in Richtung ihrer Hauptachse einfällt, hervorheben, trifft leider nicht zu. Die Richtwirkung aller gängigen Modelle beruht alleine darauf, dass Schall aus anderen Richtungen als “von vorne” mehr oder minder unterdrückt wird. Anders ist dies nur bei der Verwendung eines Parabolspiegels.

Manche Anwender überschätzen die Möglichkeiten eines stark richtenden Mikrofons, weil sie erwarten, dass sie damit eine Schallquelle genauso orten können, wie sie selbst. Dies ist aber auf ein monofones Mikrophon nicht übertragbar. Der Mensch wertet die erste Wellenfront stereophon aus und kann nur deshalb auch im diffusen Schallfeld noch orten.

Wie hoch der Einfluss des diffusen Schallfelds ist, kann man abschätzen, indem man sich vorstellt, um wie viel leiser das gleiche Schallereignis bei gleichem Abstand in weniger reflektierender Umgebung – z.B. im Freien – wäre.

Die Dynamik

Nach diesen Betrachtungen zu Frequenzgängen und Richtdiagrammen soll die Dynamik diskutiert werden. Sie – bzw. ihre Grenzen – werden aus praktischen Gründen fast nur für hochwertige Kondensatormikrofone angegeben.

Die alleinige Angabe der Dynamik sagt noch nichts darüber aus, ob das Mikrophon auch für die Aufnahme sehr leiser Geschehnisse geeignet ist. Ein Dynamikge-

winn kann z. B. alleine durch eine Erhöhung des Grenzschalldrucks erzielt werden, unter Beibehaltung des Grundgeräuschs. Im Hinblick auf die Vorzüge der Digitaltechnik wäre aber insbesondere ein geringes Grundgeräusch von Interesse.

Ersatzgeräuschpegel

Praktiker verwenden, auch nachdem es nicht mehr der Norm entspricht, noch gerne den Begriff der sog. “Ersatzlautstärke”. Damit wird verdeutlicht, welcher akustische Pegel dem im Mikrophon zustandekommenden Störpegel unter Zugrundelegung der Empfindlichkeit entspricht. So ist die Suche nach einem Mikrophon mit weniger als z.B. 24dB “Ersatzlautstärke” nicht sinnvoll, wenn schon die Umwelt des Studios “etwa so laut” ist.

Genau genommen ist diese Ausdrucksweise aber falsch. Lautstärke ist ein subjektives Maß, dessen Ermittlung schwierig ist. Der Pegel dagegen ist eine einfach messbare physikalische Größe. Man muss bei seiner Angabe allerdings darauf achten, ob und wie die Störung bewertet wurde. Störspannungsangaben fallen besonders niedrig aus, wenn die A-Kurve genutzt wird, was auch immer mit einer Effektivwertmessung verbunden ist. Deshalb werden solche Messergebnisse gerne in Katalogen genannt. Die A-Bewertungskurve war ursprünglich aber für ganz andere Einsatzgebiete gedacht.

Mehr Aussagekraft im Hinblick darauf, wie störend ein Signal ist, ergibt sich durch die Verwendung der CCIR-Bewertungskurve bei “quasi-peak-Messung”. Diese Messart wurde eigens für Störspannungsunter-

suchungen geschaffen. Die Katalogangaben zu Störspannungen fallen hiermit bei Kondensatormikrofonen ca. 10 - 12dB schlechter aus. Diese Relation kann aber nicht verallgemeinert werden.

Statt von der Ersatzlautstärke spricht man heute vom Ersatzgeräuschpegel oder auch vom äquivalenten Schalldruckpegel.

Der Geräuschspannungsabstand

Der Geräuschspannungsabstand ergibt sich aus dem Ersatzgeräuschpegel, indem man diesen von dem akustischen Bezugspegel von 1 Pascal abzieht (1Pa entspricht 94dB-SPL).

Da der akustische Bezugspegel weit unter Vollaussteuerung der Mikrofone liegt, kann ein Vergleich mit den Geräuschspannungsabständen anderer Geräte zu Trugschlüssen führen. Ein Geräuschspannungsabstand von z.B. 75dB mit CCIR-Bewertung ist ein exzellenter Wert für ein Mikrofon und erweckt evtl. dennoch keinen guten Eindruck. Würde man den Geräuschspannungsabstand von Mikrofonen – wie bei anderen Geräten – auf Vollaussteuerung beziehen, bekäme man Werte, die in der Digitaltechnik 24 bit erfordern.

Der Grenzschalldruck

Die obere Grenze des Dynamikbereichs ist durch den Schalldruck gegeben, bei dem das Mikrofon – bei Kondensatormikrofonen meist der Mikrofonverstärker – einen vorgegebenen Klirrfaktor von z.B. 0,5% produziert. Soll der Grenzschalldruck eines Mikrofons voll in Anspruch genommen werden, ist es empfehlenswert, den Wert des Betriebsübertragungsfaktors – meist nur Empfindlichkeit genannt – zu betrachten. Es gibt Kondensatormikrofone, die bei Grenzschalldruck Linienpegel oder mehr abgeben. Dadurch kann es an dem Eingang, an den das Mikrofon angeschlossen wird, zur Übersteuerung kommen, die oft fälschlich dem Mikrofon angelastet wird. So können auch Popp- und Windprobleme, die mit hohen Ausgangsspannungen der Mikrofone verbunden sind, am Mischpulteingang entstehen, obwohl das Mikrofon selbst noch störungsfrei arbeitet. Diese Schwierigkeiten treten mit dynamischen Mikrofonen selten auf, weil sie viel geringere Pegel liefern als Kondensatormikrofone.

Impedanzen

Bei der Verarbeitung höchster Pegel durch Mikrofon und Mischpult müssen schließlich die Impedanzverhältnisse besondere Beachtung finden. Während dynamische Mikrofone hinsichtlich ihres Abschlusswiderstands relativ unkritisch sind, wird die maximale Aussteuerbarkeit von Kondensatormikrofonen allgemein durch einen

zu niederohmigen Abschluss – z.B. 200Ω – stark reduziert. Dies hängt mit den Impedanzwandlerschaltungen der Mikrofonverstärker zusammen.

Generell soll der Innenwiderstand eines Mikrofons im Interesse geringer Störempfindlichkeit und geringen Rauschens so niederohmig wie möglich sein. Der Abschlusswiderstand soll dagegen so hochohmig sein, dass das Mikrofon praktisch im Leerlauf arbeitet. Auch für dynamische Mikrofone ist dies vorteilhaft, schließlich bildet die Impedanz des Mikrofons mit der Impedanz des Eingangs einen Spannungsteiler, der frequenzabhängig sein kann, da die Komponenten R, L und C für Mikrofon und Eingang nicht einheitlich sind. Frequenzangaben von Mikrofonen gelten stets für den Leerlauf. Eine Parallelschaltung von Mikrofonen ist daher generell unvertretbar. Das eine Mikrofon wird durch das andere zu stark belastet. Entkopplungswiderstände würden ins Rauschen eingehen, und im Falle von Kondensatormikrofonen würde die Phantomspannung beeinträchtigt sein (siehe Aufsatz 13).

Die Tatsache, dass Studiomikrofone sehr oft einen Innenwiderstand von 200Ω haben, hängt damit zusammen, dass meist Spulen im Einsatz sind, z.B. die Spule eines dynamischen Mikrofons oder die Sekundärseite eines Übertragers. Um mit diesen einen möglichst hohen Übertragungsfaktor zu erzielen, wird die Windungszahl hoch gewählt unter Ausnutzung des oberen Grenzwerts von 200Ω Innenwiderstand.

Kondensatormikrofonverstärker können auch ohne Übertrager und mit sehr niedrigem Innenwiderstand hohe Betriebsübertragungsfaktoren aufweisen (z.B. SCHOEPS CMC 54U: 15mV/Pa aus 35Ω). Die Eingangsimpedanz der angeschlossenen Geräte stellt im Betrieb die Lastimpedanz der Mikrofone dar. Sie liegt meist bei 600Ω und mehr. Damit ist der Leerlauf annähernd erfüllt.

Der Betriebsfall, bei dem ein kleiner Quellwiderstand mit einem sehr hohen Lastwiderstand abgeschlossen wird, nennt man "Spannungsanpassung". Demgegenüber sind bei Leistungsanpassung Quell- und Lastwiderstand gleich, z.B. 200Ω . Dieser Betriebsfall ist für Mikrofone nicht vorgesehen; er bringt viele Nachteile mit sich. Wenn Hersteller von 200Ω -Eingängen sprechen, so ist dies – von bedauerlichen Ausnahmen abgesehen – oft nur ein unglücklicher Jargon. Tatsächlich beträgt die Impedanz dieser Eingänge nämlich durchaus 600Ω und mehr. Manchmal soll nichts weiter damit ausgedrückt werden, als dass die Empfindlichkeit dieser Eingänge für normale, dynamische Mikrofone mit symmetrischem 200Ω -Innenwiderstand ausgelegt ist.

Ein weiterer Grund für die irreführende Bezeichnung "200 Ω -Eingang" kann darin liegen, dass dieser Eingang aus 200Ω Quellimpedanz betrieben werden sollte, um einen konstanten Frequenzgang zu gewährleisten. In diesen Eingängen befinden sich meist kleine Übertrager, deren Resonanzüberhöhung sehr dicht



am – oder sogar im – Übertragungsbereich liegt. Der Frequenzgang ist dann nur bei Anschluss eines Mikrofons mit 200Ω Innenwiderstand korrekt. Andere Quellwiderstände beeinflussen den Frequenzgang bei hohen Frequenzen und, auf Grund der meist kleinen Hauptinduktivität, auch bei tiefen Frequenzen.

Wird ein Mikrofon mit niedrigerer Impedanz als 200Ω an einen derartigen Eingang angeschlossen, sollten im Mikrofon oder im Kabel zwei ergänzende Widerstände symmetrisch in Serie geschaltet werden. Bei phantomgespeisten Kondensatormikrofonen ist dann zu beachten, dass diese Widerstände gepaart sind, um die Symmetrie nicht zu stören. Der Einfluss auf Pegel und Stromversorgung ist unbedeutend; man gibt lediglich die Vorteile einer besonders niedrigen Quellimpedanz für das betreffende Mikrofon auf.