



Schallschnelle, Druckgradient und Mikrofone

Mail-Antworten zu diesem Thema von Manfred Hibbing

Was nicht im Dickreiter und nicht im Webers und auch sonst kaum zu finden ist ...

UdK Berlin
Sengpiel
01.2000
Tutorium

Lieber Herr ...

hier ist die Erklärung des Nahbesprechungseffekts auf die Schnelle ohne Schnelle: Druckgradientenmikrofone werden durch die Differenz der Schalldrücke an zwei benachbarten Orten im Schallfeld angetrieben. Die Druckdifferenz entsteht im ebenen Schallfeld allein durch die laufzeitbedingte Phasendifferenz. Im Kugelschallfeld wirken sich zusätzlich noch die entfernungsabhängig unterschiedlichen Druckamplituden aus. Da die Phasendifferenz für eine vorgegebene Laufzeitdifferenz linear mit der Frequenz anwächst, ergibt sich bei tiefen Frequenzen ein frequenzproportionaler Antrieb (Omega-Gang, +6 dB/Okt). Die Amplitudendifferenz ist dagegen nicht frequenzabhängig, da das $1/r$ -Gesetz für alle Frequenzen gleichermaßen gilt. Dieser Effekt verursacht einen zusätzlichen frequenzunabhängigen Antrieb, dessen Größe jedoch entfernungsabhängig ist und mit der Nähe zur Schallquelle wächst. Bei einer bestimmten Übergangsfrequenz sind phasenbedingter und amplitudenbedingter Antrieb gleich groß. Unterhalb der Übergangsfrequenz ist der Antrieb frequenzunabhängig (0 dB/Okt), oberhalb steigt er mit 6 dB/Okt an. Die Übergangsfrequenz verschiebt sich nach oben, wenn das Mikrofon näher an die Schallquelle herangebracht wird. Man bezeichnet den zusätzlichen Antrieb unterhalb der Übergangsfrequenz als Nahbesprechungseffekt. Er bewirkt eine Kippung des Mikrofonfrequenzgangs um 6 dB/Okt gegenüber dem Frequenzgang im ebenen Schallfeld bzw. im Fernfeld einer Kugelschallquelle.

Druckgradientenmikrofone für allgemeine Anwendungen werden meistens so konstruiert, dass sie im Fernfeld einen möglichst ebenen Frequenzgang aufweisen. Dazu wird der Omega-Gang des Antriebs durch geeignete akustische oder elektrische Maßnahmen kompensiert, d. h. die interne Empfindlichkeit der Mikrofone steigt mit 6 dB/Okt zu den tiefen Frequenzen an. Bei diesen Mikrofonen bewirkt der Nahbesprechungseffekt einen mit 6 dB/Okt ansteigenden Frequenzgang unterhalb der Übergangsfrequenz.

Im Gegensatz dazu wird der Omega-Gang bei den so genannten Nahbesprechungsmikrofonen nur teilweise durch interne Maßnahmen kompensiert. Bei den tiefen Frequenzen erfolgt die Linearisierung des Frequenzgangs alleine durch den Nahbesprechungseffekt. Dazu muss ein bestimmter Besprechungsabstand eingehalten werden. Bei zu geringem Abstand tritt eine Überkompensation auf, bei zu großem Abstand wird die Tiefenwiedergabe abgeschwächt. Dieser Effekt kann auch bewusst zur Variation der Tiefenwiedergabe eingesetzt werden.

Abschließend noch eine Bemerkung zur Bedeutung der Schallschnelle. Offensichtlich wird sie zur Erklärung des Verhaltens der Mikrofone nicht benötigt. Mikrofonmembranen werden durch Kräfte bewegt, die durch Drücke bzw. Druckdifferenzen verursacht werden. Dagegen ist die Schallschnelle bei der Schallerzeugung von elementarer Bedeutung. Lautsprecher erzeugen über die Membranbewegung zunächst eine gleich große Schallschnelle unmittelbar vor der Membran. Die Physik des Schallfeldes bedingt aber feste Beziehungen zwischen Schallschnelle und Schalldruck. Genau das ist die physikalische Wesenheit des Begriffs "Schallfeld". Das Schallmedium erzeugt gewissermaßen aus der Schnelle einen Druck, den wir dann unmittelbar mit unseren Ohren oder mittelbar über die Mikrofone wahrnehmen können.

Mit besten Grüßen

Manfred Hibbing

Lieber Herr ...

die Thematik ist tatsächlich nicht ganz einfach. Hier der Versuch, den Knoten etwas zu lösen. Wie Sie richtig schreiben, ist der Druckgradient die räumliche Ableitung des Schalldrucks. Er ist also ein Vektor, der in die Raumrichtung mit der größten Druckdifferenz zwischen zwei dicht benachbarten Orten zeigt. Sein Betrag ist der Quotient aus der Druckdifferenz und dem Abstand der zugehörigen Orte im Schallfeld (dp/dr). Die Schallschnelle ist dagegen ein Vektor, der die Richtung und den Betrag der zum Schall gehörigen Teilchengeschwindigkeit des Mediums angibt. Druckgradient und Schallschnelle sind also zwei grundsätzlich verschiedene akustische Größen (Schallgrößen), zwischen denen es aber physikalische Beziehungen gibt, die von der Art des Schallfelds abhängen.

Alle Mikrofone, die eine Membran enthalten, also alle praktisch verwendeten Mikrofone, reagieren auf die Druckdifferenz zwischen der Vorder- und der Rückseite der Membran. Je nachdem, ob nur die Vorderseite oder auch die Rückseite an das Schallfeld angekoppelt ist, werden die Mikrofone als Druck- oder Druckgradientenmikrofone bezeichnet. Reine Druckmikrofone weisen eine Kugelcharakteristik auf, reine Druckgradientenmikrofone eine Achtercharakteristik. Man bezeichnet aber auch Mikrofone, die teilweise auf den Druck und teilweise auf den Druckgradienten reagieren, als Druckgradientenmikrofone. Beispielsweise ist die Niere je zur Hälfte Druck- und Druckgradientenempfänger. Die Bezeichnung dieser Mikrofone als Druckgradientenmikrofone ist sachlich falsch und irreführend, hat sich aber so fest etabliert, dass sie nicht mehr auszurotten ist.

Die Mikrofone (und unsere Trommelfelle) reagieren also auf Druckdifferenzen, nicht aber auf die Schallschnelle. Auch das Bändchenmikrofon nicht, obwohl es häufig als Schnellemikrofon bezeichnet wird. Das Bändchen galt früher (in den 1930er Jahren) als so leicht, dass man irrtümlich glaubte, es würde der Luftteilchenbewegung unmittelbar folgen. Das ist aber, wie ein rechnerischer Vergleich der Geschwindigkeiten zeigt, nicht der Fall. Auch die Bändchenmembran wird wie bei jedem anderen Membranmikrofon durch die Kraft angetrieben, die sich als Produkt aus der Druckdifferenz zwischen beiden Membranseiten und der Membranfläche ergibt.

Diese Antriebskraft kann eine proportionale Auslenkung oder Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Membran bewirken, abhängig davon, ob das akustische System des Mikrofons, von dem die Membran nur einen Teil darstellt, bei der betrachteten Frequenz überwiegend als Feder, Widerstand oder Masse reagiert. Jedes Feder-Masse-System besitzt eine Resonanzfrequenz. Bei Frequenzen unterhalb dieser Frequenz überwiegen die Federeigenschaften und die Antriebskraft bewirkt eine proportionale Membranauslenkung. Im Bereich der Resonanzfrequenz überwiegt die Widerstandsdämpfung und bewirkt eine zur Antriebskraft proportionale Geschwindigkeit. Oberhalb der Resonanzfrequenz dominiert die Masse des Systems und bewirkt eine zur Antriebskraft proportionale Beschleunigung (Newtonsches Gesetz: Kraft = Masse x Beschleunigung).

Das Bändchen besitzt eine sehr tiefe Resonanzfrequenz, die wegen der hohen Dämpfung oft gar nicht zu erkennen ist. Daher dominiert nahezu im gesamten Übertragungsbereich die Masse der Membran und der angekoppelten Luftteilchen. Die Bändchenmembran ist üblicherweise auf beiden Seiten dem Schallfeld ausgesetzt. Daher ist die antreibende Druckdifferenz bei Frequenzen, deren zugehörige Wellenlängen groß gegen die Bändchenabmessungen sind, proportional zum Druckgradienten. Der Druckgradient wächst proportional mit der Frequenz (Omega-Gang, +6 dB/Okt). Die resultierende Antriebskraft bewirkt eine frequenzproportionale Beschleunigung der Bändchenmembran. Die Ausgangsspannung des Bändchenmikrofons ist, wie bei allen dynamischen Wandlern, proportional zur Membrangeschwindigkeit (Induktionsgesetz). Da die Geschwindigkeit das Integral der Beschleunigung ist, ergibt sich eine Kippung des Frequenzgangs um -6dB/Okt und es entsteht insgesamt ein ebener Frequenzgang.

Die Phasenbilanz für Sinusschall sieht folgendermaßen aus. Der Druckgradient eilt dem Druck um 90° voraus (Differentiation). Da beim dynamischen Wandler nicht die Beschleunigung, sondern die Geschwindigkeit ausgewertet wird (Integration), wird die Phase um 90° zurück gedreht. Insgesamt ist die Ausgangsspannung des Bändchenmikrofons in Phase mit dem Schalldruck, obwohl es als so genanntes Druckgradientenmikrofon arbeitet. Grundsätzlich gilt, dass alle Mikrofone, unabhängig von ihrer Richtcharakteristik, immer mit dem Schalldruck in Phase sind, wenn ihre Frequenzgänge eben sind. Damit sind diese Mikrofone auch untereinander in Phase. Das erklärt unter anderem, wieso das Straus-Paket funktioniert.

Man kann darüber philosophieren, ob das Bändchenmikrofon und andere Mikrofone mit Achtercharakteristik als Druckgradienten- oder Schnelleempfänger bezeichnet werden können. Wie bereits gesagt, gibt es keine praktisch verfügbaren Mikrofone, die eine unmittelbare Auswertung der Schallschnelle vornehmen. Ebenso gibt es im strengen Sinne auch keine Druckgradientenmikrofone, da diese das Schallfeld an infinitesimal benachbarten Stellen abtasten müssten. Dazu wären beliebig kleine Membranen erforderlich. Aber alle so genannten Druckgradientenmikrofone tun dieses näherungsweise bei nicht allzu hohen Frequenzen. Da ideale Druckgradientenmikrofone eine Achtercharakteristik aufweisen, wird dieses Kriterium oft umgekehrt und zur Definition benutzt, indem man alle Mikrofone mit Achtercharakteristik als Druckgradientenmikrofone oder, vielleicht inzwischen etwas antiquiert, als Schnellemikrofone bezeichnet. Das ist nicht ganz richtig, aber auch nicht ganz falsch, und der Praktiker weiß, was damit gemeint ist. Aber eine gewisse Konfusion ist dabei nicht auszuschließen, wie Ihre Fragen zeigen.

Mit freundlichen Grüßen

Manfred Hibbing

Zwei idealisierte Schallfeldgeometrien spielen in der Akustik eine wichtige Rolle: Die ebene Welle und die Kugelwelle.

Für eine ebene Welle ist mit (1.4) und dem Ansatz (1.6):

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = \frac{p}{\rho_0 c}$$

$$\Rightarrow Z_0 = \rho_0 c \quad (1.13)$$

Die Impedanz ist reell, d. h. Schalldruck und Schallschnelle sind in Phase und stehen in einem konstanten Verhältnis. Die Schallintensität der ebenen Welle ist entfernungsunabhängig. Für die Intensität einer idealisierten, kugelförmig abstrahlenden Quelle (Monopol) mit der Schallleistung P , als deren Erzeuger man sich eine atmende Kugel vorstellen kann, gilt mit (1.11):

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1.14)$$

Aus der $1/r^2$ -Abhängigkeit für die Intensität (1.14) und mit $I \sim p^2$ aus (1.11) und (1.13) und der Annahme radial verlaufender Kugelwellen ergibt sich als Ansatz für den Schalldruck eines Monopols:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.15)$$

Konstante = A

Wellenzahl $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$

Wie sich die Konstante A aus den Eigenschaften des abstrahlenden Körpers ableiten lässt, soll in Kap. 4.1 in Zusammenhang mit der Schallabstrahlung wieder aufgegriffen werden. Mit (1.15.) und (1.9) lässt sich jedoch bereits jetzt für die Schallschnelle ableiten:

$$v(r, t) = \frac{A}{r} \left(\frac{1}{\rho_0 c} + \frac{1}{j\omega \rho_0 r} \right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.16)$$

Für den Wellenwiderstand gilt dann mit (1.10):

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{\rho c} + \frac{1}{j\omega \rho r}} \quad (1.17)$$

Für die akustische Impedanz einer Kugelwelle können somit zwei Grenzfälle unterschieden werden:

(a): $1/\omega \rho r \gg 1/\rho c \quad \Leftrightarrow \quad r \ll c/\omega = \lambda/2\pi$ („**Nahfeld**“)

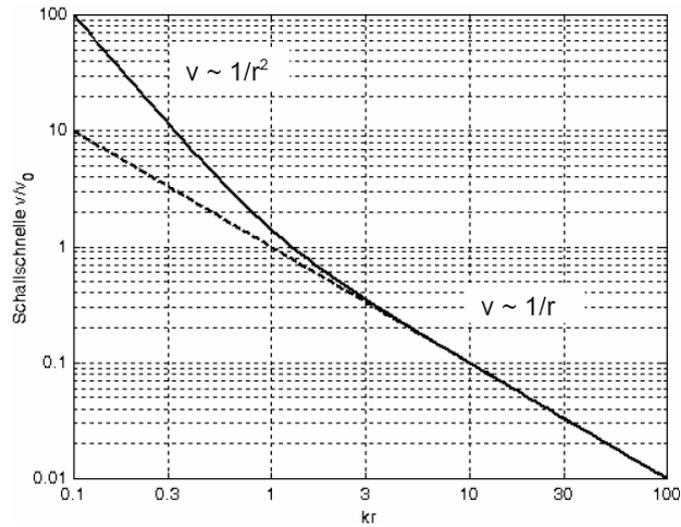
$$Z_0 = j\omega \rho r \quad \Rightarrow \quad p \sim 1/r \text{ und } v \sim 1/r^2$$

Im Nahfeld ist Druck und Schnelle um 90° in der Phase verschoben. Der Wellenwiderstand ist imaginär und beschreibt die Last durch die mitbewegte Luftmasse (Admittanz).

(b): $1/\omega \rho r \ll 1/\rho c \quad \Leftrightarrow \quad r \gg c/\omega = \lambda/2\pi$ („**Fernfeld**“)

$$Z_0 = \rho c \quad \Rightarrow \quad p \sim 1/r \text{ und } v \sim 1/r$$

Im Fernfeld sind Druck und Schnelle in Phase. Dieses ist konsistent mit (1.11), da sich das Schallfeld eines Monopols in weiter Entfernung von der Quelle näherungsweise wie eine ebene Welle verhält. Der Wellenwiderstand ist reell und beschreibt die Last durch die Verdichtung des Mediums (Massenreaktanz).



Verlauf der Schallschnelle beim Übergang von Nahfeld zu Fernfeld

Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist somit eine frequenzabhängige Größe. Der überproportionale Anstieg der Schallschnelle im Nahfeld führt bei Mikrofonen, die als Gradienten- bzw. Schnelleempfänger ausgelegt sind, zu einer Überbetonung tiefer Frequenzen (Nahbesprechungseffekt).