

Akustische Arbeitsweise eines Elektret-Kondensator-Mikrophons mit Richtcharakteristik

Freeman W. Frain
Alan P. Woodard

Zusammenfassung Die für zwei typische Richtmikrophone dargestellten Daten sollen als Richtlinie dienen. Die möglichen Beugungseffekte um ein Gehäuse herum sollten stets im Auge behalten werden. Die gezeigten Kurven gelten für Bedingungen, welche extreme, durch den Abstand der Schallöffnungen bedingte Wirkungen auf ein Mindestmaß begrenzen; der effektive Schallöffnungsabstand bleibt jedoch immer noch der Hauptparameter, der die Leistung bestimmt. Die gezeigten Daten gelten für ein typisches Mikrophon; daher treten von Gerät zu Gerät Abweichungen von diesen Kurven auf. Die hier dargestellten Kurven dürften sich in der Nähe der mittleren Wiedergabekurve befinden.

1. Einleitung

Das ungerichtete, druckabhängige Mikrophon sowie das Druckgradienten-Mikrophon erster Ordnung sind die beiden heutzutage am meisten verbreiteten Mikrophontypen. Das ungerichtete Mikrophon erzeugt eine elektrische Ausgangsspannung in Abhängigkeit von einem dargebotenen akustischen Signal und tastet diesen Schalldruck an einem einzelnen Punkt im Schallfeld ab. Da das druckabhängige Mikrophon auf einen Schalldruck an einem einzigen Punkt anspricht, hängt seine Ausgangsspannung nicht von der Ausbreitungsrichtung dieser Schallwelle ab, es sei denn, daß Beugungseffekte als Folge der Schallwellen-Verzerrung vorliegen, die auf die Abmessungen des Mikrophons zurückzuführen sind. Daher wird dieser Mikrophontyp als ungerichtet bezüglich seiner Richtcharakteristik bezeichnet.

Das Druckgradienten-Mikrophon erster Ordnung mißt den Schalldruck dagegen an zwei Punkten des Schallfeldes und spricht auf einen Unterschied zwischen diesen beiden Schalldrücken an. Im wesentlichen reagiert das Mikrophon also auf den Druckunterschied des momentanen Schalldruckfeldes, dem es ausgesetzt wird. Bei diesem Mikrophontyp sind in Abhängigkeit von der Bauart des Mikrophons verschiedene Arten von Richtcharakteristiken möglich. Die am häufigsten verwendeten Mikrophontypen sind folgende: Mikrophon mit Achtercharakteristik, mit Kardioidcharakteristik (Nierencharakteristik), Superkardioid- oder Hyperkardioidcharakteristik. Das Mikrophon mit Achtercharakteristik wird wegen seiner Störschall unterdrückenden Eigenschaften vor allem bei Nahbesprechung, wie z. B. als Lippenmikrophon, eingesetzt. Bis vor kurzem handelte es sich bei den Mikrophonen mit Kardioid- und Superkardioidcharakteristik um physikalisch große Geräte, die im Rundfunk und bei Hi-Fi-Anwendungen verwendet wurden, wo eine Richtungsunterscheidung erforderlich war. Für verschiedene Anwendungen wurde jedoch großer Wert auf Miniaturmikrophone mit Kardioidcharakteristik, vor allem vom Elektret-Typ, gelegt. Diese Mikrophone erweisen sich dort als ideal, wo ein robustes Miniaturgerät für Anwendungen erforderlich ist, die eine Richtwirkung verlangen.

1. Introduction

The two principal categories of microphones generally in use today are omnidirectional pressure responding microphones and first-order pressure gradient directional microphones. The omnidirectional microphone generates an electrical output in response to an applied acoustic pressure signal, and senses this pressure at a single point in the sound field. Because the pressure microphone responds to the sound pressure at a single point, its output does not depend on the direction of propagation of this sound wave, except for diffraction effects due to the distortion of the sound wave caused by the microphone's physical size. Thus, this type of microphone is called omnidirectional in its directional response.

The first-order gradient microphone senses the sound pressure at two points in a sound field and responds to the difference in these two pressures. In essence, the microphone responds to the gradient of the instantaneous sound pressure field to which it is exposed. Several different kinds of directional responses are possible with this type of microphone, depending on the microphone design. The most frequently used designs are bidirectional, cardioid, and super-cardioid or hypercardioid. The bidirectional is used principally in close-talking application, such as lip microphones, because of its noise cancelling properties. Until recently, the cardioid and super-cardioid microphones were physically large and were used for broadcast and Hi-Fi applications where directional discrimination was required. However, a great deal of emphasis has been placed on miniature cardioid microphones, particularly of the electret type, for several applications. These microphones are ideal where a rugged miniature unit is required in applications requiring directional discrimination.

This application note is intended to help the designer and engineer apply these miniature cardioid electret microphones to his requirement. Because these microphones are two-port devices, their performance is strongly dependent on the position and relative spacing of these ports and on the tube or channel connecting the microphone ports to the sound field.

Acoustical Performance of an Electret Condenser Microphone with Directional Characteristics

Summary *The data presented for two typical microphones are intended to serve as a guide. The possible effects of diffraction around a housing should always be kept in mind. The curves shown are for conditions which minimize extreme port spacing effects; however, effective port spacing is still the principal parameter determining performance. The data shown are for a typical microphone; thus, variations from these curves will occur from unit to unit. The curves presented here should be near the average response.*

Dieser Anwendungshinweis soll dem Konstrukteur und Ingenieur helfen, Miniatur-Elektret-Mikrophone mit Kardioidcharakteristik für seine Erfordernisse zu verwenden. Da diese Mikrophone mit zwei Schalleintrittsöffnungen versehen sind, hängt ihre Wirkung weitgehend von der Lage und dem relativen Abstand zwischen diesen beiden Öffnungen und von der Schalleitung oder dem Schallkanal, der die Schalleintrittsöffnungen mit dem Schallfeld verbindet, ab. Die folgenden Erörterungen und Daten veranschaulichen die Wirkung, die durch den Abstand zwischen den beiden Schalleintrittsöffnungen und den Leitungscharakteristiken erzeugt wird.

2. Funktionsprinzip und Bauart

In dieser kurzen Erörterung der grundlegenden Funktionsprinzipien der Druckgradienten-Mikrophone erster Ordnung soll auf die Bedeutung hingewiesen werden, die der Lage und dem relativen Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen für den richtigen Betrieb der Mikrophone zukommt. Später wird gezeigt, daß der Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen nicht nur die Empfindlichkeit eines Mikrophones, sondern auch seine Richtwirkung bestimmt.

Ein Druckgradienten-Mikrofon erster Ordnung mit Achtercharakteristik stellt hinsichtlich Bauart den einfachsten Mikrophontyp dar. Wie bereits der Name sagt, ist seine Richtwirkung symmetrisch vorwärts und rückwärts gerichtet. Abb. 1 zeigt schematisch eine Grundkonstruktion. Das Elektret-Element wird auf beiden Seiten dem akustischen Signal ausgesetzt, das Gehäuse wird möglichst symmetrisch gestaltet. Die Gleichung für ein akustisches Signal, das in diese Richtung wandert, lautet:

$$p = p_0 \cos 2\pi/\lambda (ct-x) \quad (1)$$

dabei bedeutet:

λ = Wellenlänge des Signals,

c = Schallgeschwindigkeit,

t = Zeit,

x = Abstand in der gezeigten Richtung und

p_0 = effektiver Schalldruck des Signals

The following discussion and data illustrate the effects of port spacing and tube or channel characteristics.

2. Operating Principle and Design

To indicate why the port location and relative spacing are so important for the proper operation of the microphones, the following is a brief discussion of the basic operating principles of first-order gradient microphones. As will be evident, the spacing between the ports determines not only the sensitivity of a microphone but also its directional behavior.

A bidirectional first-order gradient microphone has the simplest construction of this class of microphone. As the name implies, its directional behavior is symmetric forwards and backwards. Fig. 1 shows a basic design, schematically. The electret element is exposed on both sides to the acoustic signal, and the case or housing design is made as symmetric as possible. The equation for an acoustic signal travelling in the direction shown is:

$$p = p_0 \cos 2\pi/\lambda (ct-x) \quad (1)$$

where:

λ = the wavelength of the signal,

c = the speed of sound,

t = time,

x = the distance in the direction shown and

p_0 = the rms sound pressure of the signal.

The output of the microphone is proportional to the difference in the sound pressure level acting instantaneously on the two sides of the electret element, and is given by

$$e_o = V_e (p_1 - p_2) \quad (2)$$

where V_e is a constant depending on the characteristics of the electret element and preamplifier.

The difference between p_1 and p_2 is due to the phase difference of the two signals, because the sound wave has to travel a longer time to reach position p_2 than position p_1 . This distance depends principally on the size of the microphone. The

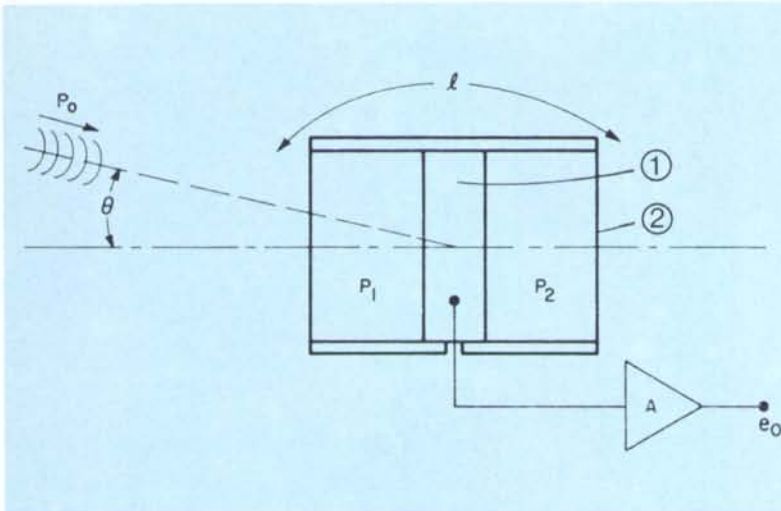


Abb. 1 Schematische Darstellung einer vereinfachten, zweiseitig gerichteten Mikrophoneausführung

Fig. 1 Schematic diagram of simplified bidirectional microphone design

- ① Elektret-Element
Electret Element
- ② Mikrofon-Gehäuse
Microphone Housing

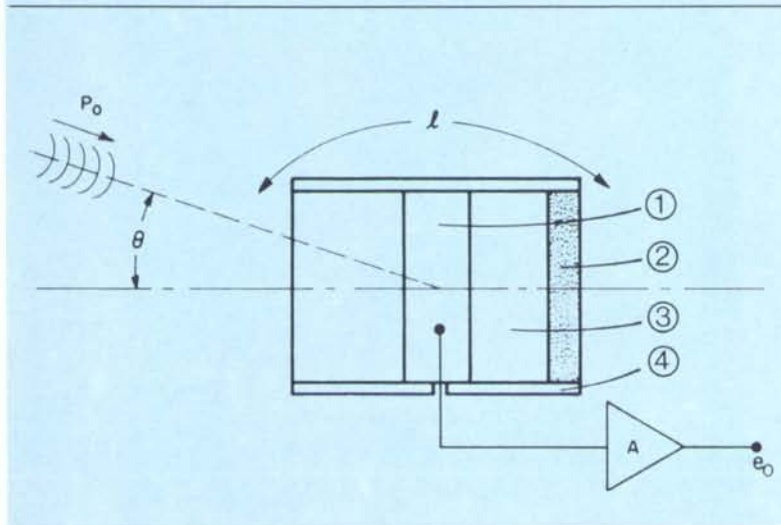


Abb. 2 Schematische Darstellung einer vereinfachten Ausführung eines Kardioidmikrophons

Fig. 2 Schematic diagram of a simplified cardioid microphone design

- ① Elektret-Element
Steifigkeit des Elements, C_D
Electret Element
Element Compliance, C_D
- ② Akustischer Widerstand, R
Acoustic Resistance, R
- ③ Steifigkeit des Luftvolumens, C_A
Air Volume-Compliance, C_A
- ④ Mikrofon-Gehäuse
Microphone Housing

Die Ausgangsspannung des Mikrophons verhält sich proportional zur Differenz im Schalldruckpegel, der momentan auf die beiden Seiten des Elektret-Elementes einwirkt, und wird durch folgende Gleichung bezeichnet:

$$e_o = V_o(p_1 - p_2) \quad (2)$$

V_o steht für eine Konstante als Funktion der Charakteristiken der Elektret-Membrane und des Vorverstärkers. Der Unterschied zwischen p_1 und p_2 ist auf den Phasenunterschied der beiden Signale zurückzuführen, da die Schallwelle eine längere Zeit braucht, um Stellung p_2 zu erreichen als Stellung

distance is shown as l in Fig. 1. It is not exactly any given dimension of the microphone, as certain diffraction effects influence its value; however, it is mainly determined by the spacing of the microphone's acoustic ports. If the wave equation (1) is put into equation (2) and solved assuming l is small compared to λ , the following result is obtained for the magnitude of the microphone's output:

$$e_o = V_o p_o \frac{2\pi}{\lambda} l \cos \Theta \quad (3)$$

The angle Θ is the angle between the axis of the microphone

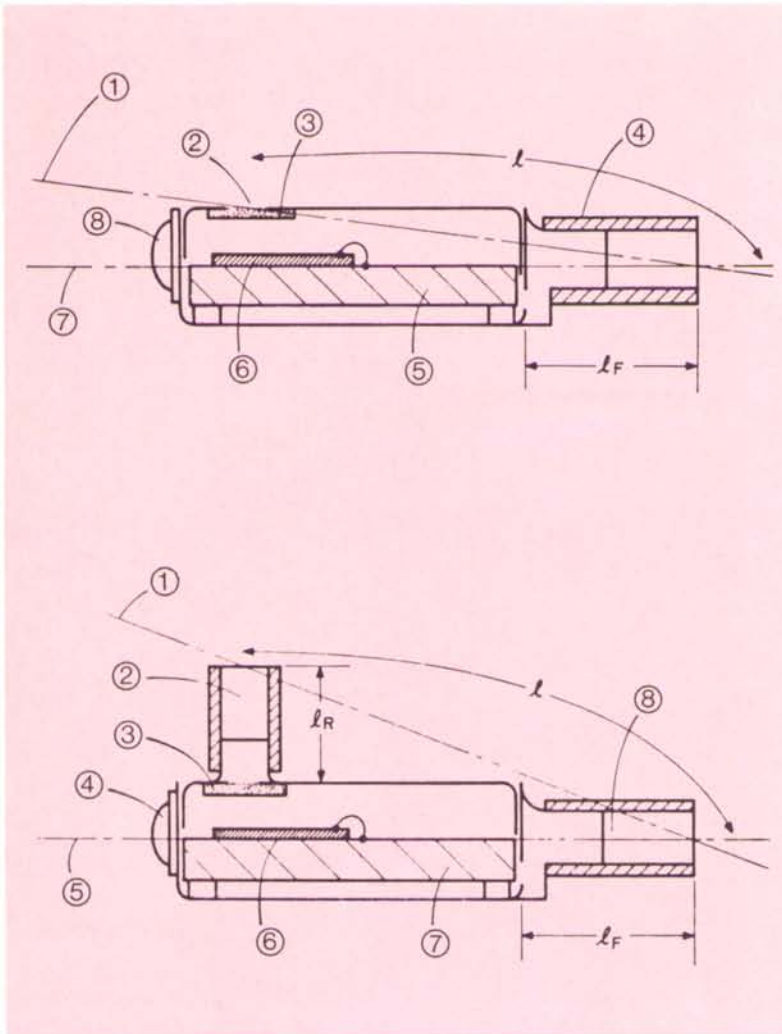


Abb. 3a Konstruktion und Gestaltung der Schalleintrittsöffnung, Typ 1

Fig. 3a Design and porting configuration, type 1

- ① Effektive Schallöffnungsachse
Effective Port Axis
- ② Rückwärtige Schalleintrittsöffnung
Rear Port
- ③ Akustischer Widerstand
Acoustic Resistance
- ④ Leitung an Frontöffnung
Tube on Front Port
- ⑤ Elektret-Element
Electret Element
- ⑥ Vorverstärker
Preamplifier
- ⑦ Mikrofonachse
Microphone Axis
- ⑧ Ausgangsklemmen
Output Terminals

Abb. 3b Konstruktion und Gestaltung der Schalleintrittsöffnung, Typ 2

Fig. 3b Design and porting configuration, type 2

- ① Effektive Achse der Schalleintrittsöffnung
Effective Port Axis
- ② Rückwärtige Öffnung mit Zuleitung
Rear Port with Tube
- ③ Akustischer Widerstand
Acoustic Resistance
- ④ Ausgangsklemmen
Output Terminals
- ⑤ Mikrofonachse
Microphone Axis
- ⑥ Vorverstärker
Preamplifier
- ⑦ Elektret-Element
Electret Element
- ⑧ Frontöffnung mit Zuleitung
Front Port with Tube

p_1 . Dieser Abstand hängt vornehmlich von der Mikrofongröße ab. Der Abstand ist in Abb. 1 als l ausgewiesen. Da bestimmte Beugungseffekte seinen Wert beeinflussen, ist er nicht an irgendeine ganz bestimmte Abmessung des Mikrophons gebunden; er ist jedoch weitgehend durch den Abstand der Schalleintrittsöffnungen des Mikrophons bestimmt. Setzt man die Wellengleichung (1) in Gleichung (2) ein und löst man die Gleichung unter der Annahme, daß l im Vergleich zu λ klein ist, erhält man für die Größe der Mikrofonspannung folgendes Ergebnis:

$$e_o = V_o p_o \frac{2\pi}{\lambda} l \cos \Theta \quad (3)$$

and the propagation direction of the sound. This result illustrates the bidirectional behavior. It also indicates that the output rises with frequency, since it is dependent on l/λ . This is characteristic of all bidirectional microphones and is a result of the output being dependent on the pressure gradient in the sound field. Equation (3) also indicates the bidirectional microphone's dependence on l .

The directional characteristic of the bidirectional microphone does not produce a front-to-back discrimination; however, a minimum in the response occurs at right angles to the microphone axis, as equation (3) shows. To obtain the front-to-back discrimination of a cardioid or super-cardioid

Der Winkel Θ ist der Winkel zwischen Mikrofonachse und der Ausbreitungsrichtung des Schalles. Dieses Ergebnis veranschaulicht die Achtercharakteristik. Damit ist auch gesagt, daß die Ausgangsspannung mit der Frequenz zunimmt, da sie von l/λ abhängt. Diese Erscheinung ist typisch für Mikrophone mit Achtercharakteristik und ist darauf zurückzuführen, daß die Ausgangsspannung vom Druckgradienten im Schallfeld abhängt. Gleichung (3) gibt ferner an, daß die Achtercharakteristik des Mikrophons von l abhängt.

Das Richtungsverhalten des Mikrophons mit Achtercharakteristik ergibt keine Vor-/Rückunterscheidung; es ergibt sich jedoch eine minimale Richtwirkung in rechten Winkeln zur Mikrofonachse, was aus Gleichung (3) hervorgeht. Um eine Vor-/Rückunterscheidung bei Mikrofonen mit Kardioid- oder Superkardioidcharakteristik zu erreichen, muß die akustische Wirkung eines symmetrischen Mikrophons (Abb. 1) unausgeglichen sein. Damit wird angestrebt, den auf der p_2 -Seite der Elektret-Membran eintretenden Schall so zu verzögern, daß für eine Schallwelle aus einem Winkel von 180° die Verzögerung, die eintritt, um das Elektret-Element zu erreichen, fast gleich ist der Verzögerung, die sich bei Erreichen von p_1 ergibt. Die Verzögerung selbst wird durch den Abstand l herbeigeführt. Stimmen diese Verzögerungen genau überein, entsteht an der Elektret-Membran kein Druckunterschied und folglich auch keine Spannung. Auf diese Weise erzielt man also die Kardioidcharakteristik.

Abb. 2 zeigt die Konstruktion eines einfachen Mikrophons mit Kardioidcharakteristik. Die Verzögerung oder Unterschiedlichkeit wird durch Verwendung eines akustischen Widerstandes R bewirkt. Dieser Widerstand zusammen mit der Steife eines inneren Luftvolumens C_A und die Steife für die Elektret-Membran C_D bilden das Äquivalent eines elektrischen RC-Verzögerungsgliedes, wodurch die Verzögerung zustande kommt. Mit demselben analytischen Verfahren, wie es bei Mikrofonen mit Achtercharakteristik angewendet wurde, ergibt sich die Ausgangsspannung dieses vereinfachten Modells aus der folgenden Gleichung:

$$e_o = \frac{V_o p_o \frac{C_A}{C_A + C_D} (1 + \beta \cos \Theta)}{\left[1 + \frac{1}{(2\pi f R (C_A + C_D))^2} \right]^{1/2}} \quad (4)$$

wobei

$$\beta = \frac{l}{CC_A R} \quad (5)$$

ist.

Dieser Ausdruck unterscheidet sich wesentlich von der Achtercharakteristik. Das Frequenzglied

response, the acoustic response of the symmetric microphone of Fig. 1 has to be unbalanced. The objective is to delay the sound entering the p_2 side of the electret element so that for a sound wave approaching from 180° the delay to reach the electret element is nearly the same as the delay to reach p_1 , this delay being caused by the distance l . If these delays are exactly the same, there is no pressure difference across the electret element and thus no output. This is how the cardioid response is obtained.

Fig. 2 shows the design of a simple cardioid microphone schematically. The delay or imbalance is achieved by the use of an acoustic resistance R . This resistance, together with the compliance of the internal air volume C_A and the compliance of the electret element C_D , forms the equivalent of an electrical RC lag network, providing the delay. Using the same analysis approach as for the bidirectional microphone, the output of this simplified model is:

$$e_o = \frac{V_o p_o \frac{C_A}{C_A + C_D} (1 + \beta \cos \Theta)}{\left[1 + \frac{1}{(2\pi f R (C_A + C_D))^2} \right]^{1/2}} \quad (4)$$

where

$$\beta = \frac{l}{CC_A R} \quad (5)$$

This expression is significantly different than the bidirectional. The frequency term,

$$\frac{1}{\left[1 + \frac{1}{(2\pi f R (C_A + C_D))^2} \right]^{1/2}},$$

leads again to a rising frequency response but with a more complex behavior. The directional term $(1 + \beta \cos \Theta)$ is significantly different. The term β , which is dependent on l , determines the angular response. If $\beta = 1$ then equation (4) yields a cardioid response and

$$e_o \sim (1 + \cos \Theta) \quad (6)$$

At 180° the output is zero. If β is less than one, the output does not go to zero at 180° ; the response is still cardioid-like, but with a lessened front-to-back ratio. If β is greater than one, the output is zero at some angle less than 180° but greater than 90° . This response is the so-called super-cardioid response. For this type of angular response, the front-to-back ratio is again less than that for $\beta = 1$. Finally, as β becomes very large, R in equation (5) becomes small, and the output approaches the bidirectional response.

Equations (4) and (5) clearly illustrate the importance of the

$$\frac{1}{\left[1 + \frac{1}{(2\pi f R (C_A + C_D))^2}\right]^{1/2}}$$

führt wiederum zu einer ansteigenden Frequenzkurve, wenn auch das Verhalten hier vielschichtiger ist. Der Richtungsdruck $(1 + \beta \cos \Theta)$ weicht wesentlich ab. Der Ausdruck β , der von l abhängt, bestimmt die Winkelempfindlichkeit. Wenn $\beta = 1$ ist, dann ergibt sich aus Gleichung (4) eine kardioidförmige Charakteristik und

$$e_o \sim (1 + \cos \Theta) \quad (6)$$

Bei einem Winkel von 180° ist die Ausgangsspannung Null. Wenn β kleiner ist als Eins, sinkt die Ausgangsspannung bei 180° nicht auf Null ab; die Richtwirkung entspricht noch immer der Kardioidcharakteristik, aber mit einem geringeren Vor-/Rückverhältnis. Wenn β größer ist als Eins, ist die Ausgangsspannung Null bei einem Winkel unter 180° , aber größer als 90° . Hier liegt dann die sogenannte Superkardioidcharakteristik vor. Für diese Art der Winkelempfindlichkeit ist das Vor-/Rückverhältnis wiederum kleiner als bei $\beta = 1$. Schließlich wird β sehr groß, R in Gleichung (5) wird klein, und die Ausgangsspannung nähert sich der Achtercharakteristik.

Die Gleichungen (4) und (5) verdeutlichen die Wichtigkeit des effektiven Öffnungsabstands l sowie die akustischen Komponenten C_A , C_D und R dieses vereinfachten Modells. Im Gegensatz zum Mikrofon mit Achtercharakteristik spielt beim Kardioidmikrofon die Weglänge l im Richtungsverhalten und in der Beeinflussung seiner Empfindlichkeit eine wichtige Rolle. Wie oben erwähnt, führt das frequenzabhängige Glied in Gleichung (4) zu einem steigenden Frequenzgang. Eine sorgfältige Analyse dieses Glieds zeigt, daß, wenn l groß ist, mit einem Studio- oder Hi-Fi-Mikrofon der steigende Frequenzgang auf niedrige Frequenzen, mit einer flachen Wiedergabekurve darüber, begrenzt werden kann. Damit kann ein Mikrofon dieser Bauart oberhalb 100 bis 200 Hz eine flache Wiedergabekurve aufweisen. Bei Miniatur-Kardioidmikrofonen ist die Strecke l klein, und es läßt sich eine flache Wiedergabekurve nur bei hohen Frequenzen erzielen. Die flache Strecke der Frequenzkurve bleibt gewöhnlich auf Frequenzen oberhalb 2000 bis 3000 Hz beschränkt.

Die Abb. 3a und 3b zeigen die Konstruktion der beiden Mikrophone. Der eine Mikrofontyp 2 gleicht, abgesehen von einem rückseitigen Stutzen, dem anderen Typ 1. Wie beim vereinfachten Modell oben handelt es sich beim Verzögerungselement um einen akustischen Widerstand, der sich in der Nähe der rückseitigen Öffnung befindet. Abb. 3a und 3b zeigen auch den effektiven Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen, vorausgesetzt, daß Leitungen an die Stutzen angesetzt wurden. Außerdem demonstrieren

effektive port spacing l , and the acoustic components C_A , C_D and R of this simplified model. Unlike the bidirectional microphone, the path length l plays an important role in the directional response of a cardioid microphone, as well as influencing its sensitivity. As mentioned above, the frequency dependent term of equation (4) leads to a rising frequency response. Careful analysis of this term will show that if l is large, as with a studio or Hi-Fi microphone, the rising response can be limited to low frequencies, with a flat response above this. Thus, a microphone of this type can have a flat response above 100–200 Hz. With miniature cardioid microphones the length l is small and it is not possible to achieve a flat response except at high frequencies. The flat portion of the response is usually limited to frequencies above 2000 to 3000 Hz.

Fig. 3a and 3b illustrate the design of two microphones. One microphone – type 2 – is the same as the other – type 1 – except for the addition of a rear snout. As with the simplified model above, the delay element is an acoustic resistance located near the rear port. Fig. 3a and 3b also show the effective port spacing, assuming that tubes have been added to the snouts. In addition, the figures illustrate geometrically that the effective angle of the microphone does not correspond to the axis of the microphone, but agrees quite closely with the axis through the ends of the tubes attached to the ports. The actual port of a microphone is at the end of the tube, or at the surface of the housing in which the microphone is installed, not at the port of the microphone alone.

Fig. 3a and 3b indicate the microphone with tubes on the ports. The both microphones have their acoustic elements adjusted to be used with tubes. Either microphone without tubing on the ports will yield only a 11–13 front-to-back separation, while both will achieve 20–25 dB or more when properly tuned. The microphone is designed this way to allow the user to port the microphone as required rather than work with a larger microphone with no porting flexibility. As the data below will show, type 2 microphone can be ported in several ways and still achieve a near optimum output. This flexibility allows the user to place the microphone in a housing at a position optimum for him and not be forced into a standard position. In addition, the tubing approach allows the user to fine tune his design to the directional discrimination required, and to be able to adjust the porting to nullify diffraction effects that may be encountered.

The next two sections present data for a variety of porting tubes for the two microphones. These data were obtained with the microphone and tubes alone, ignoring any housing effects, to minimize the complexity. In an actual application, diffraction effects around the housing in which the microphone is mounted may require adjusting the tube lengths or port locations. These adjustments have to be done on an individual basis.

Abb. 3a und 3b geometrisch, daß der effektive Winkel des Mikrophons nicht mit der Mikrophonachse, jedoch ziemlich genau mit der Achse durch die Enden der an den Öffnungen angesetzten Leitungen übereinstimmt. Die tatsächliche Öffnung eines Mikrophons befindet sich am Ende der Schalleitung oder an der Oberfläche des Gehäuses, in dem das Mikrophon eingebaut ist, nicht nur an der Schalleintrittsöffnung des Mikrophons.

Abb. 3a und 3b zeigen das Mikrophon mit Leitungen an den Öffnungen. Bei den beiden Mikrophonen wurden deren akustische Elemente so angepaßt, daß sie mit Leitungen verwendet werden können. Jedes Mikrophon ohne Zuleitung an den Öffnungen ergibt nur ein Vor-/Rückverhältnis von 11 bis 13 dB, während beide bei richtiger Abstimmung 20 bis 25 dB oder mehr erreichen. Das Mikrophon wurde so konstruiert, damit der Benutzer die Schalleintrittsöffnungen am Mikrophon nach Bedarf einstellen kann, anstatt mit einem größeren Mikrophon ohne diese Verstellmöglichkeiten arbeiten zu müssen. Wie aus den nachstehenden Daten hervorgeht, können beim Mikrophon des Typs 2 die Schalleintrittsöffnungen verschieden angeordnet werden, um immer noch eine nahezu optimale Ausgangsspannung zu erreichen. Diese Flexibilität gestattet es dem Benutzer, das Mikrophon in einem Gehäuse in einer für ihn optimalen Stellung anzubringen, ohne zu einer Standard-Stellung gezwungen zu sein. Außerdem erlaubt die Zuleitung dem Benutzer, sein Modell auf die erforderliche Richtungsunterscheidung fein abzustimmen und die Schallöffnungen so einzustellen, daß möglicherweise auftretende Beugungseffekte aufgehoben werden.

Die nächsten beiden Abschnitte stellen Daten einer Vielzahl von Schalleintrittsleitungen für die beiden Mikrophone dar. Diese Daten wurden mit dem Mikrophon und den Zuleitungen allein erzielt, wobei Gehäuse-Effekte unberücksichtigt blieben, um die Dinge möglichst einfach zu halten. In der Praxis können die Beugungseffekte um das Gehäuse, in dem das Mikrophon eingebaut ist, eine Anpassung der Leitungslängen oder die örtliche Anordnung der Schalleintrittsöffnungen erfordern. Diese Anpassung muß auf individueller Basis erfolgen.

3. Leistung und Abstimmung von Typ 1

Das Mikrophon des Typs 1 wurde so konstruiert, daß es eine optimale Leistung ergibt, wenn die vordere Schalleintrittsöffnung um 7 bis 9 mm über dem Gehäuseabschluß hinaus mit einem Leitungsstutzen, wie in Abb. 3a gezeigt, verlängert wird. Dieser Wert für l_f wurde aus mehreren Gründen gewählt. Aufgrund des größeren Phasenunterschieds zwischen den beiden Schalleintrittsöffnungen wird mit der Anhebung von l_f eine höhere Empfindlichkeit erzielt. Ein zu langer Stutzen erfordert jedoch große Öffnungsabstände im Gehäuse, in dem ein Mikrophon eingebaut ist, was seine

3. Performance and Tuning

The type 1 microphone has been designed to yield optimum performance when its front port is extended 7 to 9 mm beyond the end of the case with a tube, as shown in Fig. 3a. This value of l_f was chosen for several reasons. Greater sensitivity is obtained as l_f is increased, due to the larger phase difference between the two ports. However, too long a tube requires large port spacings in any housing in which the microphone is mounted, precluding its use in miniature designs. In addition, the tube on the front port changes the high frequency response of the microphone. The model shown in Fig. 2 was simplified to point out the directional behavior of a cardioid microphone, and does not show this effect. In the actual microphone, the mass of the air in the tube and the resistance associated with the tube decrease the resonant frequency of the microphone as the tube length increases. Because of all these factors, miniature cardioid microphones are generally tuned so that the optimum response occurs with tubes between 6 and 9 mm. This range yields effective front-to-back port spacings of 12 to 15 mm.

Fig. 4 to 7 indicate the free field responses of a typical type 1 microphone with no extra tube on the snout and tubes to yield l_f values of 4 mm, 8 mm, and 12 mm. The tubing used is a 1.4 mm i. d. tube. These curves were obtained with the microphone alone (i.e., no housing effects). The angles shown are relative to the effective port axis which, as Fig. 3a and 3b show, varies somewhat from the microphone's housing axis. The output is shown for an open circuit condition, assuming a 1.3 volt power supply.

Fig. 4 to 6 indicate the full operating range of the type 1 microphone. With no extra tube on the front snout, the separation is 12.5 dB at 1000 Hz, and the sensitivity is -62.0 dB (RE: 1V/ μ bar) at this frequency. The microphone has been tuned to provide a flattened response in the 3-5 kHz range. As the tube length is increased, the sensitivity is increased, the separation increases, and there is a small reduction in the resonant peak frequency. With an l_f of 8 mm, the typical separation is 21 dB, and the sensitivity is -59 dB.

Fig. 7 has been included to indicate the result of using values of l_f larger than 8 mm. With an l_f of 12 mm the microphone response is no longer cardioid as it is in the first three cases, but has gone beyond cardioid. The front-to-back ratio at 1 kHz has decreased to 15 dB, but there is also now a minimum in the response at 150°. In terms of Equation (4), β is greater than 1.0. The long tube also reduces the resonant frequency further, while increasing the sensitivity only slightly.

The geometric port spacing for the microphone with tubes added to its front port is given by adding 6.5 mm to the value of l_f . A housing with exactly the same geometric port spacing length as one of the above curves may not yield the

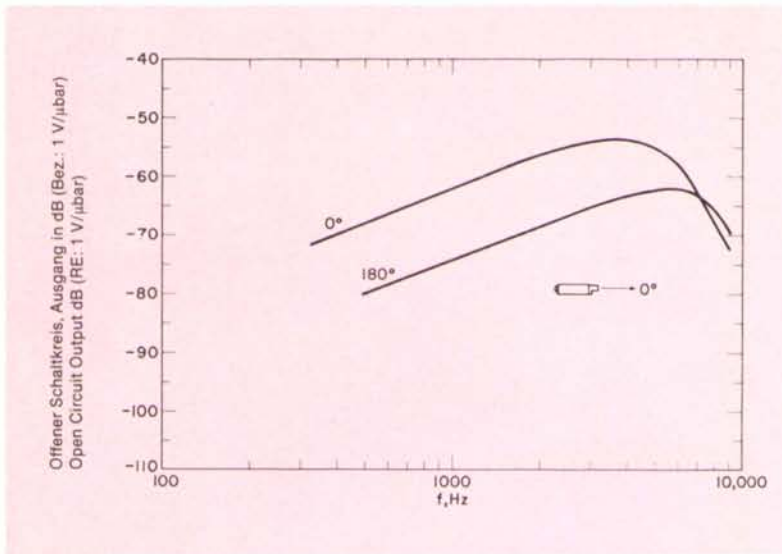


Abb. 4 Fernfeld-Wiedergabekurve ohne Stutzen an der Frontöffnung, Mikrofontyp 1

Fig. 4 Far field response with no tube on front port, type 1 microphone

Verwendung in Miniatur-Konstruktionen ausschließt. Außerdem ändert der Rohrstutzen an der vorderen Schallöffnung den Frequenzgang des Mikrophons bei höheren Frequenzen. Abb. 2 zeigt ein vereinfachtes Modell, um das Richtungsverhalten eines Kardioidmikrophons zu verdeutlichen, es demonstriert also diesen Effekt nicht. Beim tatsächlich verwendeten Mikrophon vermindern die Luftmenge im Leitungsstutzen und der mit dem Stutzen verbundene Widerstand die Resonanzfrequenz des Mikrophons mit zunehmender Leitungslänge. Aufgrund all dieser Faktoren sind Miniatur-Kardioidmikrophone im allgemeinen so abgestimmt, daß die optimale Wiedergabe bei Leitungsstutzen mit einer Länge von 6 und 9 mm auftritt. Dieser Bereich ergibt effektive Abstände zwischen vorderer und rückwärtiger Schallöffnung von 12 bis 15 mm.

Abb. 4 bis 7 zeigen die Freifeld-Kurve eines typischen Mikrophons des Typs 1, ohne zusätzliche Leitung am Stutzen und mit Leitungen, mit denen l_p -Werte von 4 mm, 8 mm und 12 mm zu erreichen sind. Bei der verwendeten Leitung handelt es sich um einen Rohrstutzen von 1,4 mm Innendurchmesser. Diese Kurven wurden mit dem Mikrophon allein (d.h. ohne Gehäusewirkungen) erzielt. Die gezeigten Winkel verhalten sich relativ zur effektiven Schallöffnungsachse, die laut Abb. 3a und 3b von der Achse des Mikrophongehäuses geringfügig abweicht. Die Ausgangsspannung gilt für einen offenen Schaltkreis, bei einer angenommenen Spannungsversorgung von 1,3 V.

Abb. 4 bis 6 veranschaulichen den vollen Arbeitsbereich des Mikrofontyps 1. Ohne zusätzliche Leitung am vorderen

performance shown in these figures when a type 1 microphone is installed in it because of wave diffraction effects. The diffraction effects occur due to the shape of the housing and the design of the housing ports, introducing an additional delay for the sound wave's travel. These effects can either lengthen or shorten the actual port spacing, depending on the exact details of the design. Thus, to achieve an identical performance the port spacing measured on the housing may have to be increased or decreased somewhat. If a geometric spacing slightly larger than 12.7 mm is used (corresponding to an 8 mm tube), diffraction effects are minimized, as the front-to-back separation reaches a maximum at this value of l_p and decreases for both larger and smaller values of l_p . Thus, for small diffraction effects, the separation does not vary significantly near this optimum tuning length.

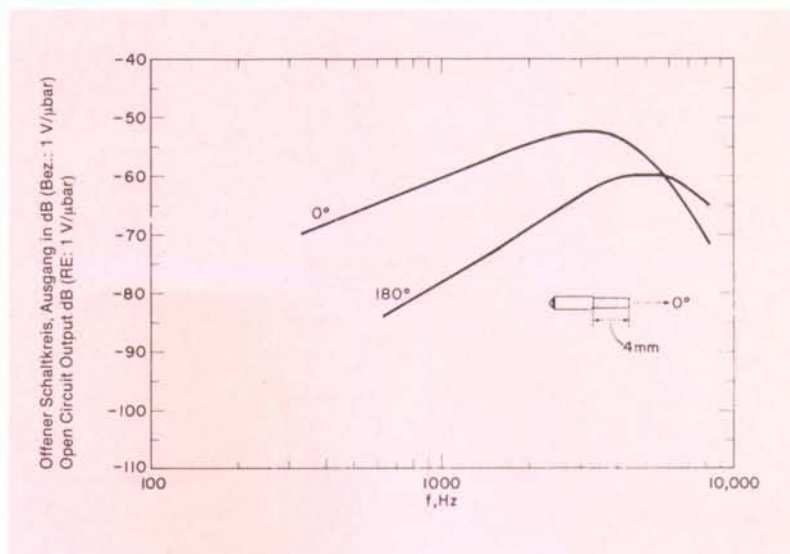
The curves in Fig. 4 to 7 were obtained using 1.4 mm i.d. tubes. A larger diameter tube mated properly to the snout will improve the separation at any length, usually by 1 or 2 dB, and with longer lengths will avoid some of the loss in high frequency response. Tubes smaller than 1.3 mm i.d. should be avoided because of excessive loss of separation and loss of high frequencies due to a large amount of damping resistance associated with the tube.

4. Performance and Tuning of type 2

The type 2 microphone is identical to the type 1 except that it has a snout at the rear port. In many applications it is desirable to be able to connect to both the front and rear ports with

Abb. 5 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 1 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der Frontöffnung zur Erzielung eines l_f von 4 mm

Fig. 5 Far field response of type 1 microphone with 1.4 mm i. d. tube on front port to yield $l_f = 4$ mm



Stutzen beträgt die Vor-/Rückerkennung bei 1000 Hz 12,5 dB; die Empfindlichkeit bei dieser Frequenz liegt bei -62,0 dB (bezogen auf 1 V/μbar). Das Mikrophon wurde so aufgebaut, um eine flache Wiedergabe im 3–5 kHz-Bereich zu erzielen. Mit zunehmender Leitungslänge wird die Empfindlichkeit vergrößert, die Vor-/Rückunterscheidung nimmt zu, während sich die Resonanzspitzenfrequenz leicht vermindert. Bei einem l_f von 8 mm, beträgt die typische Unterscheidung 21 dB, die Empfindlichkeit -59 dB.

Abb. 7 zeigt das Ergebnis bei Verwendung von l_f -Werten über 8 mm. Bei einem l_f von 12 mm ist die Kurve des Mikrophons nicht mehr kardioidförmig wie in den ersten drei Fällen, sondern geht darüber hinaus. Das Vor-/Rückverhältnis bei 1 kHz sinkt auf 15 dB ab, aber nun ist auch in der Wiedergabe bei 150° ein Mindestwert erreicht. Laut Gleichung (5) ist β größer als 1,0. Der lange Leitungskanal setzt auch die Resonanzfrequenz weiter herab, während die Empfindlichkeit nur geringfügig angehoben wird.

Der geometrische Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen beim Mikrophon mit an der vorderen Öffnung angesetzten Stutzen ergibt sich durch Hinzufügen von 6,5 mm zum Wert von l_f . Aufgrund von Beugungseffekten kann es geschehen, daß ein Gehäuse mit genau demselben geometrischen Abstand zwischen den Schallöffnungen (siehe eine der oben erwähnten Kurven) nicht die in diesen Abbildungen gezeigte Leistung ergibt, wenn ein Mikrophon des Typs 1 eingebaut wird. Die Beugungseffekte werden von der Gehäuseform und der Konstruktion der Gehäuseöffnungen verursacht, wodurch eine zusätzliche Verzögerung im Schallwel-

tubes. This approach is particularly helpful in preventing acoustical leaks inside the housing between the two ports. Leaks of this type will drastically change the microphone's performance.

In designing the both microphones, the possibility of using the microphone with tubes on the rear had to be taken into account. The simplified cardioid microphone design shown in Fig. 2 does not show the influence of the ports. A complete model of the microphone indicates that not only is the value of the acoustical resistance important, but the various inductances and resistances associated with the front and rear snouts and tubes must also be balanced in order to achieve good results. This is much like balancing a complex impedance electrical bridge, where both the real and complex components have to balance in order to achieve the best null.

The both microphones could have been designed to yield optimum front-to-back separation with no tubes or snouts connected to the rear port. However, this leads to a reduction in the front-to-back separation whenever a tube is used at the rear port. In many applications of the type 1 microphone, the rear porting in the housing amounts to an effective port for the microphone, and would lead to a degradation in the performance of a type 1 if the microphone were designed this way. In addition, the type 2 design would not be practical. To avoid these problems, the both microphones have been designed to work with snouts and tubes on the rear port. In many situations, somewhat better front-to-back separation can be obtained than is shown in the type 1 curves. With this design approach the both microphones are more widely

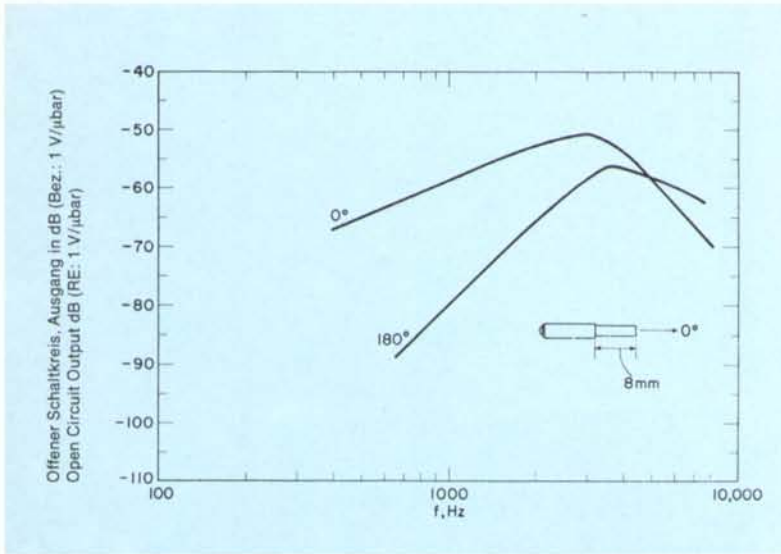


Abb. 6 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 1 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der Frontöffnung, um einen l_F von 8 mm zu erzielen

Fig. 6 Far field response of type 1 microphone with 1.4 mm i. d. tube on front port to yield $l_F = 8$ mm

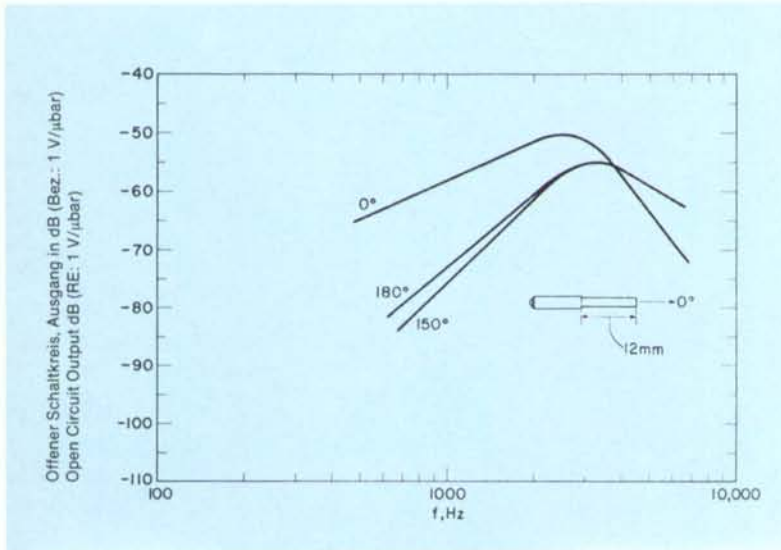


Abb. 7 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 1 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der Frontöffnung zur Erzielung eines l_F von 12 mm

Fig. 7 Far field response of type 1 microphone with 1.4 mm i. d. tube on front port to yield $l_F = 12$ mm

lenweg auftritt. Diese Effekte können je nach den genauen Konstruktionseinzelheiten die tatsächlichen Schallöffnungsabstände verlängern oder verkürzen. Um daher eine gleiche Leistung zu erzielen, müssen die am Gehäuse gemessenen Schallöffnungsabstände geringfügig vergrößert oder verkleinert werden. Wird ein geometrischer Abstand von knapp über 12,7 mm genommen (entsprechend einem 8-mm-Stut-

useable than if they were designed for optimum separation with no porting on the rear.

Because it is possible to operate the type 2 microphone with tubes both front and rear, a large number of frequency response curves is necessary to describe fully the possible combinations of tube lengths and relative positions of the tube ends, particularly if the rear tubing is angled. The

zen), so werden die Beugungseffekte auf ein Mindestmaß begrenzt, da die Vor-/Rückunterscheidung bei diesem l_f -Wert ein Maximum erreicht, während sie sich sowohl bei größeren als auch kleineren l_f -Werten vermindert. Daher schwankt bei geringen Beugungseffekten die Unterscheidung nicht nennenswert in der Nähe dieser optimalen Abstimm-länge.

Die Kurven in Abb. 4 bis 7 wurden unter Verwendung von Zuleitungen mit einem Innendurchmesser von 1,4 mm erzielt. Ein am Stutzen richtig eingepaßtes Rohrstück mit größerem Durchmesser verbessert die Unterscheidung bei jeder beliebigen Länge, meist um 1 bis 2 dB, und bei größeren Längen werden Verluste im höheren Frequenzbereich vermieden. Die Verwendung von Leitungen mit einem Innendurchmesser unter 1,3 mm ist wegen des außergewöhnlich hohen Unterscheidungsverlustes, der Absenkung bei höheren Frequenzen und wegen des größeren, mit dem Leitungsnippel verbundenen Dämpfungswiderstandes zu vermeiden.

4. Leistung und Abstimmung von Typ 2

Das Mikrofon des Typs 2 entspricht dem Typ 1 mit dem Unterschied, daß an der rückseitigen Schallöffnung ein Stutzen vorhanden ist. In vielen Anwendungen ist eine Anschlußmöglichkeit für Rohrnippel an der vorderen als auch rückseitigen Schallöffnung wünschenswert. Dies ist besonders hilfreich bei der Verhütung von akustischen Streuungen innerhalb des Gehäuses zwischen den beiden Schallöffnungen. Durch Streuungen dieser Art wird die Leistung des Mikrophons weitgehend verändert.

Bei der Gestaltung beider Mikrophone mußte die Möglichkeit, das Mikrofon mit Zuleitungen an der Rückseite einzusetzen, berücksichtigt werden. Diese vereinfachte Kardioidmikrofon-Konstruktion laut Abb. 2 zeigt den Einfluß der Schalleintrittsöffnungen nicht. Ein vollständiges Modell des Mikrophons zeigt, daß nicht nur der Wert des akustischen Widerstands bedeutsam ist, sondern, daß zur Erzielung guter Ergebnisse auch die mit den vorderen und rückseitigen Stutzen und Leitungen verbundenen, verschiedenen Induktivitäten und Widerstände symmetrisch sein müssen. Das ähnelt ziemlich dem Abgleichen einer komplexen, elektrischen Impedanzbrücke, wo sowohl die einfachen als auch komplexen Bestandteile ausgeglichen sein müssen, um einen optimalen Nullabgleich zu erreichen. Die Mikrophone hätten so ausgelegt sein können, daß sie eine optimale Vor-/Rückunterscheidung ohne Anschluß von Zuleitungen oder Stutzen am hinteren Schalleintritt ergeben hätten. Dies führt jedoch immer dann zu einer verminderten Vor-/Rückunterscheidung, wenn eine Leitung an der rückseitigen Öffnung verwendet wird. Bei vielen Anwendungen des Mikrofontyps 1 bedeutet die rückwärtige Schallöffnung im Gehäuse eine effektive Schalleintrittsöffnung für das Mikrofon, was bei einer solchen Konstruktion zu einer Leistungsver schlech-

following curves represent a number of combinations which yield near-optimum results and are representative of the complete family. For the rear tube angled at other than 0° or 90° , as shown in these curves, the results will be similar to those shown if the geometric port spacing length is about the same, and the tube length ratio front-to-back is the same. Again, as with the type 1, housing diffraction will affect the results, making it necessary to "fine tune" the design. The tube lengths used in these figures yield results which are not strongly dependent on the values of l_f and l_b , and thus "fine tuning" is not usually necessary. It should be remembered, however, that the port spacing changes significantly if the angle of the rear tubing is varied, even though the lengths are fixed. Thus, an 8 mm rear tube yields a cardioid response if it is perpendicular to the microphone when a 4 mm front tube is used, but will yield a beyond cardioid result if angled toward the rear by 45° . Likewise, it will yield a low separation if angled toward the front port by 45° . Therefore, it is important to determine the geometric spacing between ports and adjust the tube lengths to match the values in the curves in Fig. 8 and 9 as closely as possible.

Fig. 8 and 9 indicate the frequency response and front-to-back separation when the rear tube is perpendicular to the microphone axis. Fig. 8 is the result for an 8 mm front tube and a 4 mm rear tube. The geometric port spacing for this configuration is 15 mm which is slightly larger than the port spacing for no rear tube. The angular response has not gone beyond cardioid; this would be expected from the type 1 results if this spacing was obtained by increasing l_f beyond 8 mm, because of the tuning effects of the rear tube. It is this tuning effect that also leads to the improved separation shown in Fig. 8 (24 dB at 1 kHz). The 0° frequency response closely follows that of the type 1 with an 8 mm front tube. This tube reduces the resonant peak, as is true with the type 1.

The same geometric port spacing can be obtained by increasing the front tube length and decreasing the rear. However, two effects produce a less desirable response:

- The resonant peak is lowered further by the longer front tube.
- The tuning effects of the rear tube are lost, which leads to a reduction in the separation and eventually, as l_b decreases, a beyond-cardioid response.

If the tubes are adjusted the opposite way, by decreasing l_f and increasing l_b , a family of responses is obtained which lies between Fig. 8 and Fig. 9. Fig. 9 is the response for $l_b = 8$ mm, and $l_f = 4$ mm. The 1 kHz separation is 21 dB, and the geometric port spacing of 13 mm is slightly lower than Fig. 8. The most significant differences between these two responses is that the high frequencies have improved with the shorter 4 mm front tube, and the separation is better at high frequencies, although not as good at 1 kHz. These differences are related to the tuning effects of the tubes.

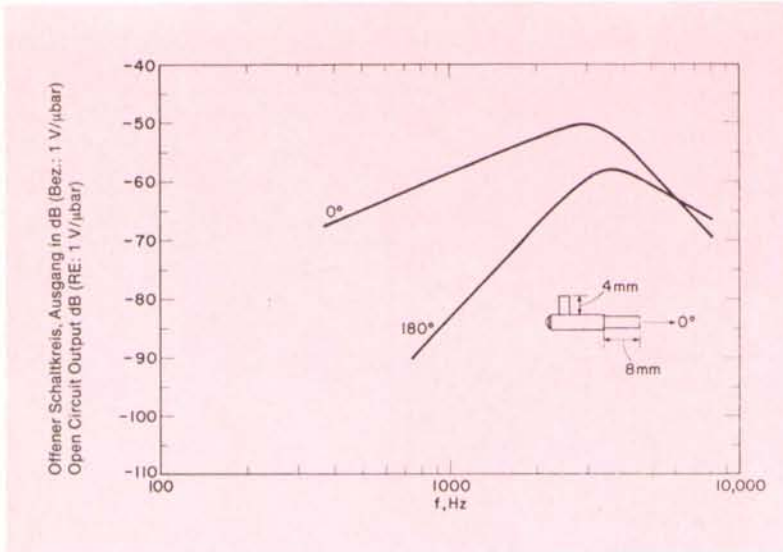


Abb. 8 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 2 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der vorder- und rückseitigen Schalleintrittsöffnung, $l_f = 8$ mm, $l_R = 4$ mm

Fig. 8 Far field response of type 2 microphone with 1.4 mm i. d. tubes on front and rear ports. $l_f = 8$ mm, $l_R = 4$ mm

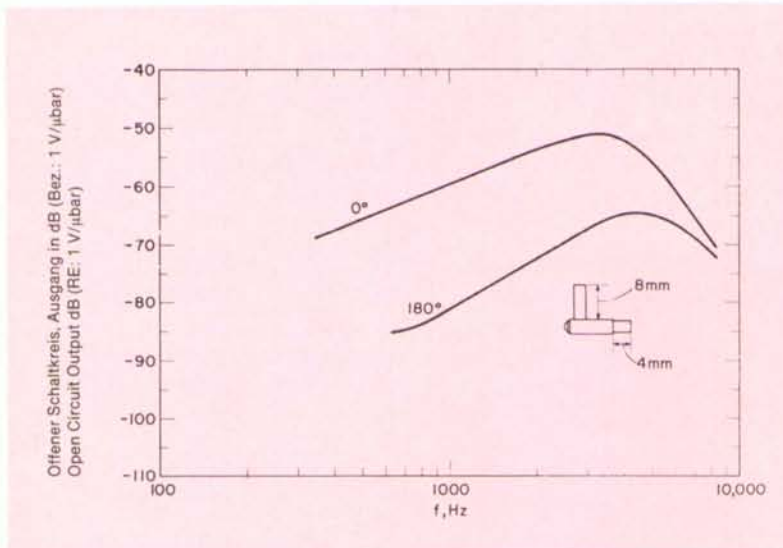


Abb. 9 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 2 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der vorder- und rückseitigen Schalleintrittsöffnung, $l_f = 4$ mm, $l_R = 8$ mm

Fig. 9 Far field response of type 2 microphone with 1.4 mm i. d. tubes on front and rear ports. $l_f = 4$ mm, $l_R = 8$ mm

terung des Typs 1 führen würde. Außerdem wäre die Typ-2-Konstruktion nicht praktisch. Um diesen Schwierigkeiten vorzubeugen, wurden beide Mikrophone derart ausgelegt, daß sie mit Stutzen und Zuleitungen an der rückwärtigen Schallöffnung arbeiten. In manchen Situationen läßt sich eine bessere Vor-/Rückunterscheidung erzielen als bei den Wiedergabekurven für Typ 1. Bei dieser Bauart steht beiden

If the rear tubing length is increased but the 13 to 15 mm port spacing is maintained, the response degrades from Fig. 9; the front-to-back separation is reduced. Thus, Fig. 8 and 9 represent the limits for optimum tuning if the rear tube is close to perpendicular to the microphone.

The second most important geometry that can be used to tune the type 2 microphone is shown in Fig. 10 and 11. In these

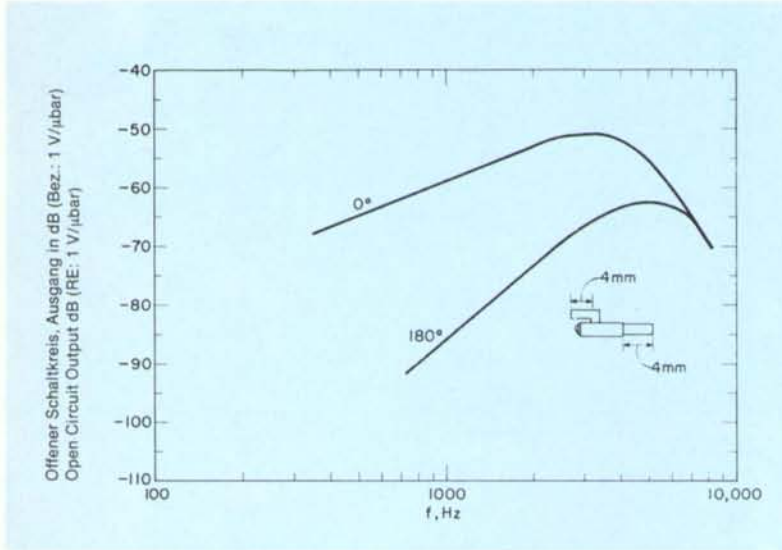


Abb. 10 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 2 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der vorder- und rückseitigen Schalleintrittsöffnung. $l_f = 4$ mm, $l_R = 4$ mm

Fig. 10 Far field response of type 2 microphone with 1.4 mm i.d. tubes on front and rear ports. $l_f = 4$ mm, $l_R = 4$ mm

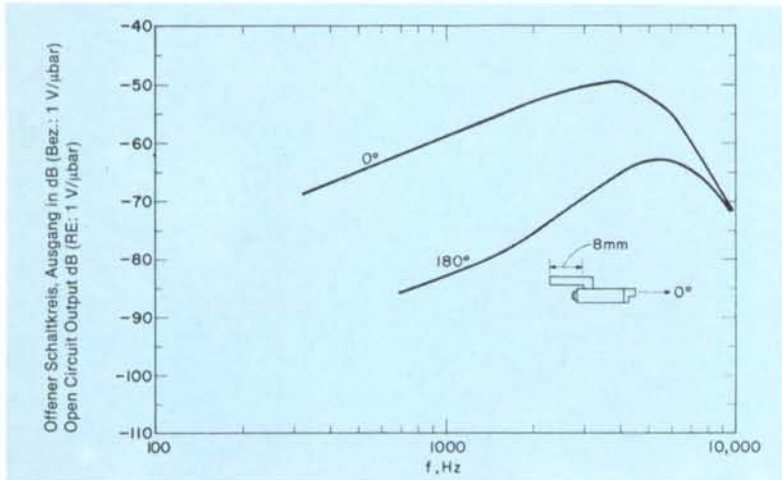


Abb. 11 Fernfeld-Wiedergabekurve eines Mikrophons vom Typ 2 mit Stutzen von 1,4 mm Innendurchmesser an der rückwärtigen Schalleintrittsöffnung. $l_R = 8$ mm

Fig. 11 Far field response of type 2 microphone with 1.4 mm i.d. tube on rear port. $l_R = 8$ mm

Mikrofonen ein breiteres Anwendungsgebiet offen, als wenn sie für eine optimale Unterscheidung ohne rückwärtige Schalleintrittsöffnung ausgelegt wären.

Da es möglich ist, den Mikrophontyp 2 mit Zuleitungen sowohl vorne als auch rückwärts zu betreiben, ist eine große Anzahl von Frequenzkurven erforderlich, um die Kombinationsmöglichkeiten von Leitungslängen und relativen Stellungen der Leitungsenden vollständig zu beschreiben, was besonders dann gilt, wenn das rückwärtige Leitungsansatz-

curves, the tubes face in opposite directions. Most applications of the type 2 will lie between this geometry and that of the perpendicular tube. As is evident from Fig. 10, tuning the microphone with both front and rear tubes of 4 mm yields a very good response. The frequency response is the same as the type 1 with a 4 mm front tube, but the 1 kHz separation is 27 dB. The geometric port spacing is 15 mm, which is the same as Fig. 8. The additional separation is again due to a near optimum tuning.

stück gewinkelt ist. Die folgenden Kurven stellen eine Anzahl von Kombinationen dar, die nahezu optimale Ergebnisse liefern und für die ganze Kurvenschar repräsentativ sind. Bei einer rückwärtigen Zuleitung mit einem anderen Winkel als 0° oder 90° (siehe Kurven), werden die Ergebnisse denjenigen ähneln, die auftreten, wenn der geometrische Abstand zwischen den Schalleinlaßöffnungen ungefähr gleich ist und das Leitungslängenverhältnis zwischen Vorderseite und Rückseite übereinstimmt. Wie beim Typ 1 beeinträchtigt auch hier wieder die Schallbeugung durch das Gehäuse die Ergebnisse, so daß eine »Feinabstimmung« der Konstruktion erforderlich ist. Die in diesen Abbildungen verwendeten Leitungslängen führen zu Ergebnissen, die nicht stark von den l_f - und l_r -Werten abhängen, so daß eine »Feinabstimmung« üblicherweise nicht erforderlich ist. Man sollte jedoch bedenken, daß selbst bei feststehenden Längen sich der Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen beträchtlich ändert, wenn der Winkel des rückwärtigen Stützens abgeändert wird. Daher ergibt ein rückwärtiger Zuleitungsstutzen von 8 mm eine kardioidförmige Charakteristik, wenn er bei Verwendung einer frontseitigen Leitung von 4 mm senkrecht zum Mikrofon liegt, liefert jedoch eine über die Nierenform hinausgehende Kurve bei einem Winkel von 45° gegen den rückseitigen Schalleintritt. In gleicher Weise ergibt sich auch eine kleinere Unterscheidung, wenn der Winkel gegen die frontseitige Schallöffnung 45° beträgt. Deshalb ist es wichtig, den geometrischen Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen zu ermitteln und die Leitungslängen möglichst eng an die Werte der Kurven (Abb. 8 und 9) anzupassen.

Abb. 8 und 9 zeigen die Frequenzwiedergabe und die Vor-/Rückunterscheidung, wenn die rückwärtige Leitung senkrecht zur Mikrofonachse steht. Abb. 8 demonstriert das Ergebnis bei einer vorderseitigen Leitung von 8 mm und einer rückwärtigen Zuleitung von 4 mm. Der geometrische Schallöffnungsabstand beträgt für diese Gestaltung 15 mm, was geringfügig größer ist als der Öffnungsabstand bei Mikrofonen ohne rückwärtige Zuleitung. Die Richtkennlinie geht nicht über die Kardioidform hinaus; dies könnte man von den Ergebnissen für Typ 1 erwarten, wenn dieser Abstand durch Vergrößerung von l_f über 8 mm hinaus aufgrund der Abstimmwirkungen der rückwärtigen Leitung erzielt wurde. Dieser Abstimmereffekt führt auch zu der verbesserten Unterscheidung laut Abb. 8 (24 dB bei 1 kHz). Der 0° -Frequenzgang folgt eng der Wiedergabekurve von Typ 1 mit einem vorderseitigen Stutzen von 8 mm. Diese Zuleitung setzt die Resonanzspitze, wie dies für Typ 1 zutrifft, herab.

Der gleiche geometrische Schallöffnungsabstand läßt sich durch Verlängerung der frontseitigen Leitung und Verkürzung der rückwärtigen erreichen. Zwei Effekte erzeugen jedoch eine weniger wünschenswerte Wiedergabe:

a) Die Resonanzspitze wird durch die längere vorderseitige Leitung weiter vermindert.

It has been evident that the frequency response of the type 2 microphone behaves the same as that of the type 1; it is best with no front tube, which eliminates the inductive loading of the microphone. Thus, the response with parallel tubes should be the best if no front tube is used. Fig. 11 indicates the result if the rear tube is 8 mm, thus yielding the same port spacing (15 mm) as in Fig. 10. The 1 kHz separation of 24 dB is somewhat less than the previous geometry but both the high frequency separation and the high frequency 0° response are better.

These four geometries span most of the possible near optimum geometries. The general conditions that should be followed are that the geometric port spacings should be close to the values shown here (13 to 15 mm) for any angle of the rear tube, and that the best high frequency response and separations are obtained for minimum front tube lengths, although at some sacrifice in the separation at 1 kHz.

It is important to point out that if a fitting is attached to a type 1 microphone to provide a right angle, as shown in Fig. 10 and 11, the length and internal air volume of the fitting be small. A fitting with a large volume will seriously degrade the performance shown in these plots. The fitting used in these tests has an equivalent length of less than 1.5 mm tube i. diameters.

The effects of tube diameter are the same as for the type 1 microphone. Front tube diameters larger than 1.4 mm lead to somewhat better results, and diameters less than 1.4 mm should be avoided. The tube size on the rear port is not as critical. Again, however, diameters less than 1.3 to 1.4 mm should be avoided.

b) Die Abstimmefekte des rückseitigen Stützens gehen verloren, was die Unterscheidung herabsetzt und schließlich mit der Abnahme von l_r zu einer Wiedergabekurve führt, die über die Kardioidform hinausgeht.

Wenn die Leitungen entgegengesetzt angepaßt werden, wobei l_r verkleinert und l_v vergrößert wird, erhält man eine Schar von Wiedergabekurven, die zwischen Abb. 8 und Abb. 9 liegt. Abb. 9 ist die Wiedergabekurve für $l_r = 8$ mm, und $l_v = 4$ mm. Der Unterschied bei 1 kHz beträgt 21 dB, und der geometrische Abstand zwischen den Schallöffnungen von 13 mm ist etwas geringer als in Abb. 8. Die bedeutsamsten Unterschiede zwischen diesen beiden Wiedergabekurven liegen darin, daß sich die hohen Frequenzen beim kürzeren vorderseitigen Stützen von 4 mm verbessert haben und daß die Unterscheidung bei hohen Frequenzen besser ist, wenngleich nicht so gut wie bei 1 kHz. Diese Unterschiede hängen mit den Abstimmefekten der Leitungen zusammen.

Wenn die rückwärtige Leitung vergrößert, der Schallöffnungsabstand von 13 bis 15 mm jedoch beibehalten wird, verschlechtert sich die Wiedergabekurve aus Abb. 9; das Vor-/Rückverhältnis wird herabgesetzt. Daher stellen Abb. 8 und 9 die Grenzen für die optimale Abstimmung dar, wenn sich der rückwärtige Leitungsstützen fast senkrecht zum Mikrofon befindet.

Die zweite, wichtigste Geometrie, die zur Abstimmung des Mikrofontyps 2 verwendet werden kann, ist in Abb. 10 und 11 gezeigt. In diesen Kurven zeigen die Zuleitungen in entgegengesetzte Richtungen. Die meisten Anwendungen des Typs 2 liegen zwischen dieser Geometrie und bei senkrecht gestellten Leitungsstützen. Wie aus Abb. 10 hervorgeht, ergibt eine Abstimmung des Mikrophons sowohl bei vorderseitigen als auch rückseitigen Leitungen von 4 mm eine sehr gute Wiedergabe. Diese ist gleich wie beim Typ 1 mit einem frontseitigen 4-mm-Stützen; der Unterschied beträgt jedoch 27 dB bei 1 kHz. Der geometrische Schallöffnungsabstand beläuft sich auf 15 mm, was Abb. 8 entspricht. Die zusätzliche Unterscheidung geht wieder auf eine nahezu optimale Abstimmung zurück.

Es hat sich gezeigt, daß die Wiedergabekurve des Mikrofontyps 2 sich gleich verhält wie diejenige von Typ 1; sie ist am besten, wenn keine frontseitige Zuleitung vorhanden ist, wodurch die induktive Belastung des Mikrophons ausgeschaltet wird. Daher sollte der Frequenzgang bei parallelen Zuleitungen optimal sein, wenn kein frontseitiger Stützen verwendet wird. Abb. 4 zeigt das Ergebnis, wenn die rückwärtige Zuleitung 8 mm mißt, wodurch sich der gleiche Schallöffnungsabstand (15 mm) ergibt wie in Abb. 10. Der Unterschied von 24 dB bei 1 kHz ist etwas geringer als die vorhergehende Geometrie, es sind jedoch sowohl der Unterschied als auch die 0° -Wiedergabekurve bei hohen Frequenzen besser.

Diese vier Geometrien erstrecken sich über die meisten der möglichen Geometrien in der Nähe des Optimums. Die allgemeinen Bedingungen, die einzuhalten sind, lauten, daß die geometrischen Schallöffnungsabstände in der Nähe der hier (13 bis 15 mm) für jeden Winkel des rückwärtigen Stützens gezeigten Werte liegen müssen, und daß die besten Wiedergabekurven für die hohen Frequenzen und Unterschiede bei minimalen Längen der vorderseitigen Zuleitung erzielt werden, wenn auch unter bestimmten Opfern hinsichtlich des Unterschiedes bei 1 kHz.

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, daß bei Befestigung einer Armatur am Mikrofontyp 1 zur Erzielung eines rechten Winkels laut Abb. 10 und 11 die Länge und das innere Luftvolumen dieser Armatur klein sein müssen. Eine Armatur mit einem großen Volumen setzt die in diesen Diagrammen dargestellte Leistung beträchtlich herab. Die bei diesen Versuchen verwendete Armatur hat eine äquivalente Länge von weniger als 1,5 mm Leitungs-Innendurchmesser.

Die Auswirkungen des Leitungsdurchmessers sind die gleichen wie für Mikrofontyp 1. Ein Durchmesser des vorderen Kanals von mehr als 1,4 mm führt zu etwas besseren Ergebnissen, während man Durchmesser von weniger als 1,4 mm vermeiden sollte. Die Größe der Zuleitung an der rückwärtigen Öffnung ist nicht so kritisch. Auch hier sind jedoch Durchmesser von weniger als 1,3 bis 1,4 mm zu vermeiden.