

In dem hier vorliegenden vierten Teil der Artikelserie „Gehör-Mikrofon-Kopfhörer“ werden die elektroakustischen Wandler ausführlich beschrieben.

4. Elektroakustische Wandler

Diese Aufsatzreihe begann in ihrem ersten Teil mit einer ganz allgemeinen Betrachtung über die elektroakustische Übertragung von Schall (s. a. Bild 1.1). Die für die Luftschallübertragung wichtigsten Schallwandler (Mikrofone, Lautsprecher, Kopfhörer) wurden dort bereits erwähnt. Der nachfolgende vierte Teil befaßt sich ausführlicher mit diesem Thema.

Unter elektroakustischen Wandlern oder Schallwandlern versteht man ganz allgemein Systeme, die Schallenergie in elektrische Energie und umgekehrt elektrische Energie in Schallenergie umzuwandeln vermögen; die ersteren bezeichnet man als Schallempfänger, die letzteren als Schallsender. Diese Umwandlung erfolgt i. a. unter Zwischenschaltung eines schwingfähigen mechanischen Systems, dessen Hauptbestandteil – zumindest bei nahezu allen Wandlern für Luftschall – eine Membran bildet. Dieses mechanische System wird bei den Schallempfängern durch ein Schallfeld und bei den Schallsendern durch elektrische oder magnetische Kräfte zu erzwungenen Schwingungen angeregt.

Den Vorgang der Energieumwandlung kann man somit in zwei Teile gliedern:

- Umwandlung von Schallenergie in mechanische Energie (oder umgekehrt) – und
- Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie (oder umgekehrt)

Zu a):

Beim Schallempfänger (z. B. beim Mikrofon) wird das mechanische System über die Membran vom Schallfeld angeregt. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die auf das mechanische System einwirkende Kraft unmittelbar vom Schalldruck oder aber vom Schalldruckgefälle (= Schalldruckgradient) abhängt. Man spricht demzufolge entweder von einem Druckempfänger oder aber von einem Druckgradientenempfänger. Letztere zeichnen sich i. a. durch gerichtete Empfangseigenschaften aus.

Beim Schallsender (z. B. beim Lautsprecher oder Kopfhörer) wird das mechanische System durch elektrische oder magnetische Kräfte in Schwingungen versetzt. Von der Energie dieser mechanischen Schwingungen soll der Schallsender möglichst viel in Form von Schall abstrahlen.

Zu b):

Für die Umwandlung von mechanischer in elektrischer Energie (oder umgekehrt) gibt

es verschiedene Möglichkeiten. Unter Hinweis auf die Art dieses zweiten Energieumwandlungsschrittes unterteilt man generell die elektroakustischen Wandler nach demjenigen elektrischen oder magnetischen Vorgang, der unmittelbar eine Kraft auf das mechanische System ausübt (Schallsender), oder umgekehrt durch die Bewegung des mechanischen Systems hervorgerufen wird (Schallempfänger). – Diese Einteilung, nämlich nach der Art der mechanisch-elektrischen Umwandlung, kennzeichnet die Hauptmerkmale der verschiedenen elektroakustischen Wandler am besten. In der Praxis unterscheidet man daher zwischen

- elektromagnetischen,
- elektrodynamischen,
- magnetostriktiven,
- elektrostatischen – und
- piezoelektrischen Schallwandlern.

Die Schallempfänger werden darüber hinaus noch danach beurteilt, welcher mechanischen Bewegungsgröße die erzeugte elektrische Größe entspricht, nämlich entweder dem Ausschlag oder der Geschwindigkeit. Richtet sich die elektrische Größe nach dem Schwingungsausschlag des mechanischen Systems, so spricht man von einem Elongationsempfänger (Elongationsmikrofon); folgt dagegen die elektrische Größe der Schwinggeschwindigkeit, so handelt es sich um einen Geschwindigkeitsempfänger (Geschwindigkeitsmikrofon).

Schallwandler, die in beiden Richtungen, d. h. sowohl als Sender als auch als Empfänger betrieben werden können, heißen reversible Wandler. Ist ein Schallwandler nur in einer Richtung betriebsfähig, wie das z. B. bei den früheren Kohlemikrofonen in Fernsprechern oder sehr viel später beim Transistormikrofon der Fall war, so bezeichnet man ihn als irreversibel. Die irreversiblen Wandler üben lediglich eine Steuerung aus, wobei die von ihnen abgegebene elektrische Energie aus einer gesonderten Quelle stammt. Die zur Bewegung des Steuerorgans benötigte Energie wird dem Schallfeld entnommen. Man bezeichnet Wandler dieser Art auch als aktive Wandler. Die reversiblen Wandler heißen dementsprechend auch passive Schallwandler. Qualitäts-Schallwandler arbeiten i. a. stets nach dem Prinzip der reversiblen oder passiven Wandler.

Das Ausmaß, in dem es einem Schallwandler gelingt, akustische Energie in elektrische Energie oder umgekehrt elektrische

Energie in akustische Energie umzusetzen, wird durch den Wandler-Wirkungsgrad gekennzeichnet; er wird in Prozent (%) angegeben. Sieht man von ganz speziellen Ausführungen einmal ab, so sind die mit elektroakustischen Wandlern im Luftschallbereich erzielbaren Wirkungsgrade ausgesprochen niedrig. –

4.1 Wandlerprinzip

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die – für die Praxis wichtigeren – reversiblen Schallwandler.

4.1.1 Elektromagnetische Schallwandler

Elektromagnetische Schallwandler bestehen in ihrer einfachsten Ausführung aus einem Permanentmagneten mit mindestens einer Wicklung und einem beweglichen Anker aus Weicheisen, der i. a. mit einer Membran mechanisch gekoppelt ist, s. Bild 4.1. Die aus dem Magneten und dem Anker gebildete Anordnung stellt einen magnetischen Kreis dar, der durch einen Luftspalt von der Gesamtbreite a unterbrochen ist. Der Permanentmagnet sorgt für die Vormagnetisierung des Magnetkreises. Fließt ein elektrischer Strom (Symbol: i) durch die Wicklung, so wird der Anker und mit ihm auch die daran mechanisch angekoppelte Membran – je nach der Polarität des Stromes – vom Magneten angezogen bzw. abgestoßen. Die Kraftwirkung (Symbol: F) auf den Anker ist dem Quadrat des gesamten magnetischen Flusses (Symbol: Φ) proportional: $F \sim \Phi^2$. Ist der Strom i ein Wechselstrom von der Frequenz f ($= \omega/2\pi$), so erfolgt auch die Anziehung bzw. Abstoßung des Ankers mit einer sich periodisch ändernden Wechselkraft. Infolge der quadratischen Beziehung zwischen der Kraft und dem Magnetfluß wird neben der Ankerbewegung im Rhythmus der Erregerfrequenz f des Spulenstromes noch eine weitere Wechselkraft wirksam, die sich mit der doppelten Frequenz $2f$ ändert. Durch diese zweite Wechselkraft-Komponente entstehen nichtlineare Verzerrungen (Klirrfaktor!). Um diese Verzerrungen vernachlässigbar klein zu halten, muß die Vormagnetisierung Φ_0 durch den Permanentmagneten so hoch bemessen werden, daß sie sehr viel größer ist als der durch den Spulenwechselstrom im Höchsthalle erzeugte Wechselfluß $\Phi \sim$.

Breibt man das gleiche elektromagnetische Wandler-System als Schallempfänger, wobei man es zusammen mit seiner angekoppelten Membran in ein Schallfeld bringt, so wird sein Anker in Schwingungen versetzt; in der Spulenwicklung wird

von Dr. Ivar Veit
SENNHEISER electronic KG,
3002 Wedemark

dabei eine – je nach der Intensität des Schallfeldes – entsprechend hohe Wechselspannung induziert. Die Höhe dieser Wechselspannung ist um so größer, je höher die Gleichfeld-Vormagnetisierung (Φ_0) des Magnetkreises ist. – Ohne ein permanentes Magnetfeld arbeiten elektromagnetische Schallwandler nicht.

Bei dem im Bild 4.1a gezeigten rotationssymmetrischen System, und das gleiche gilt auch für die sogenannten Doppeljochsysteme, wird der magnetische Kreis über einen Weicheisen-Anker geschlossen, der den gesamten Gleichfluß Φ_0 aufnehmen muß. – Bei einer moderneren Ausführungsform für elektromagnetische Wandler, dem sogenannten Vierpolsystem (s. Bild 4.1b), geht nur der Wechselfluß durch das bewegliche Element, und zwar einen drehbaren Zungenanker. Dieser Zungenanker befindet sich im Nullzweig einer magnetischen Brückenordnung und wird daher vom Gleichfluß nicht durchflossen. Er kann daher sehr dünn und leicht ausgeführt werden. Magnetische Schallwandler mit einem Vierpolsystem lassen sich außerordentlich klein aufbauen. Derartige Systeme werden heute in nahezu allen Hörgeräten als Wiedergabewandler verwendet. Begünstigt wird ihre Anwendung in diesem Bereich durch ihren „relativ guten“ elektroakustischen Wirkungsgrad.

4.1.2 Elektrodynamische Schallwandler

Der elektrodynamische Schallwandler besteht im Prinzip aus einem feststehenden permanenten Magnetfeld und einem darin beweglichen elektrischen Leiter, der in der Praxis entweder zu einer Schwingspule aufgewickelt ist oder aber aus einer leichten Metallfolie besteht, wie z. B. beim Bändchenmikrofon. Man vermeidet bei diesem Wandlerprinzip den Umweg über die Erzeugung eines magnetischen Wechselflusses in einem Eisenkern. Inhomogenitäten des Magnetfeldes, wie sie bei der Bewegung eines Ankers entstehen können, z. B. bei Luftspaltänderungen, treten hier nicht auf. Sorgt man konstruktiv dafür, daß der bewegliche Leiter auch bei den größten noch auszuführenden Amplituden im homogenen Teil des permanenten Magnetfeldes bleibt, so lassen sich nach diesem Wandler-

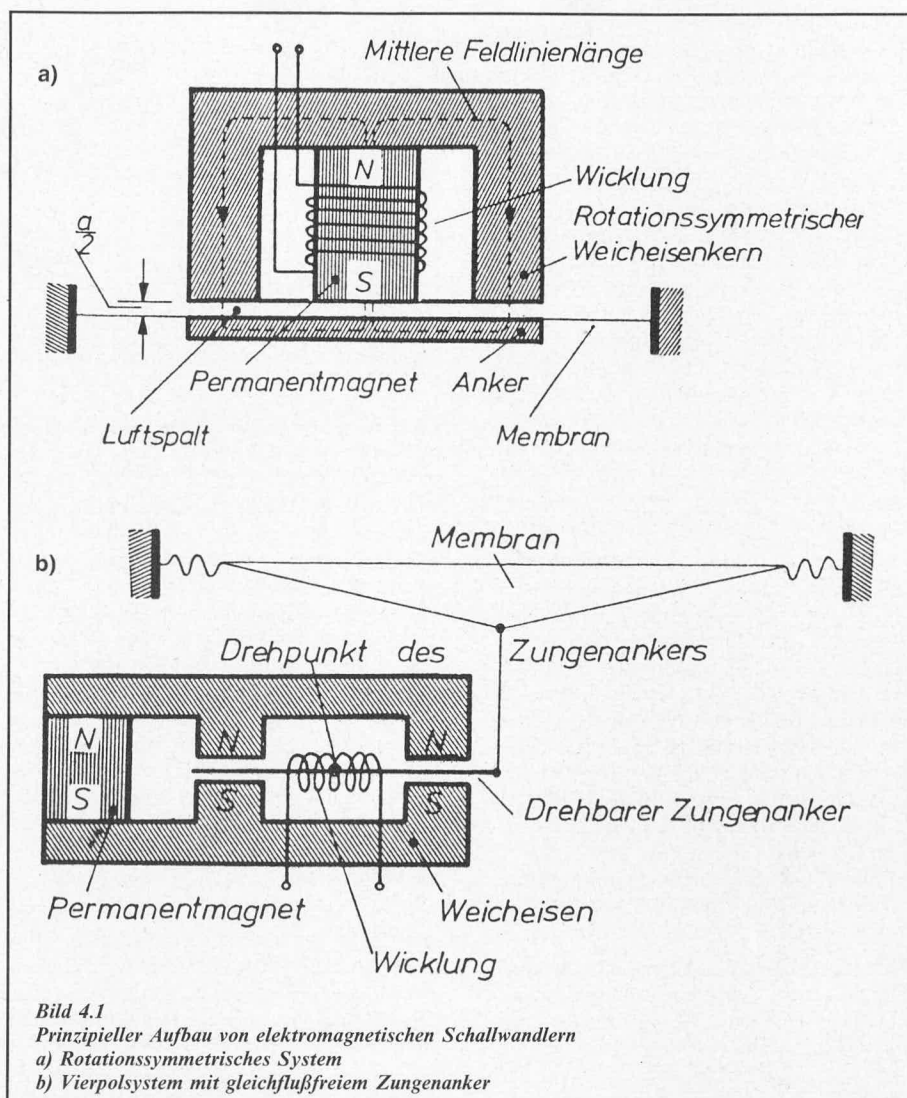


Bild 4.1

Prinzipieller Aufbau von elektromagnetischen Schallwandlern

a) Rotationssymmetrisches System

b) Vierpolsystem mit gleichflußfreiem Zungenanker

prinzip besonders verzerrungsarme Schallwandler aufbauen. Zwischen der erzeugten Wechselkraft F und dem eingespeisten Wechselstrom i besteht beim elektrodynamischen Schallsender ein linearer Zusammenhang. Das gleiche gilt auch für die Beziehung zwischen der im bewegten Leiter eines elektrodynamischen Schallempfängers induzierten Wechselspannung u und der mechanischen Bewegungsgeschwindigkeit v .

Bei den meisten praktischen Ausführungen besteht der bewegliche Leiter aus einer Schwingspule, die schwingfähig aufgehängt in einen Topfmagneten hineintaucht, s. Bild 4.2. Man spricht daher auch von einer Tauchspule. Unmittelbar an der Schwing- oder Tauchspule ist die Membran befestigt.

Die weitaus meisten Lautsprecher und Kopfhörer arbeiten heute nach dem elektro-

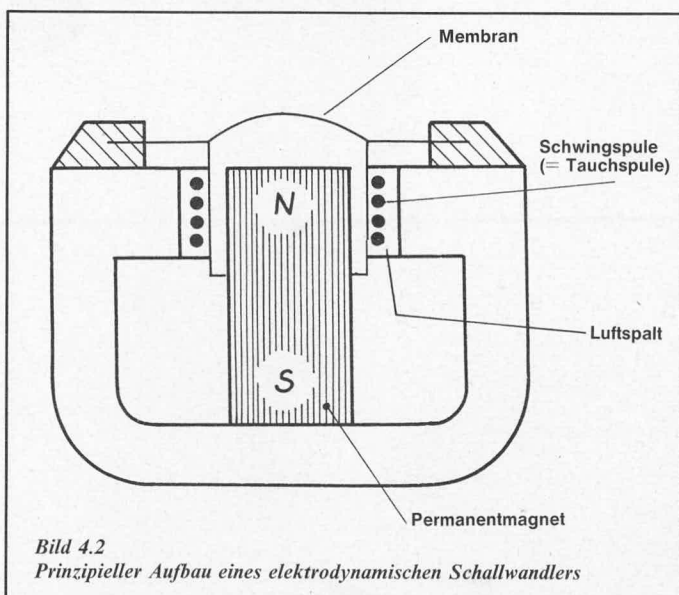


Bild 4.2

Prinzipieller Aufbau eines elektrodynamischen Schallwandlers

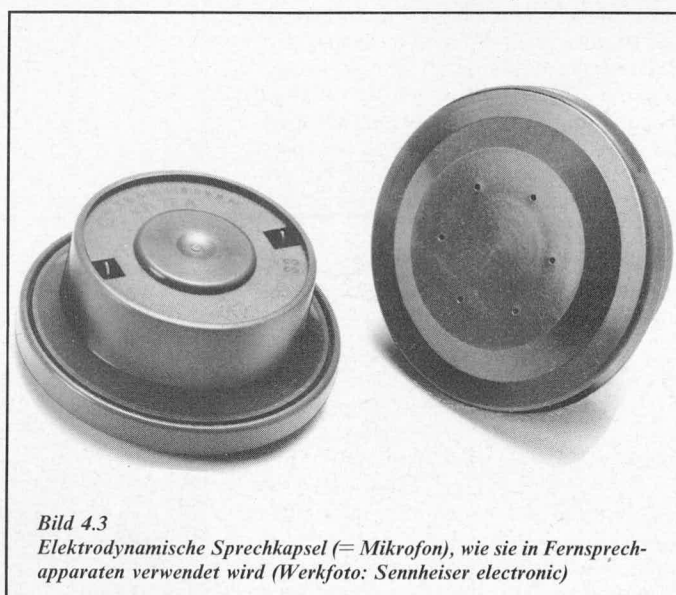


Bild 4.3

Elektrodynamische Sprechkapsel (= Mikrofon), wie sie in Fernsprechanlagen verwendet wird (Werkfoto: Sennheiser electronic)

dynamischen Wandlerprinzip. Auch das Tauchspulmikrofon, ein überall geschätztes und gern verwendetes Qualitätsmikrofon, ist ein elektrodynamischer Schallwandler. In den nächsten beiden Folgen dieser Aufsatzreihe wird über dynamische Mikrofone und Kopfhörer noch sehr ausführlich berichtet werden. – Ferner finden elektrodynamische Hör- und Sprechkapseln (s. a. Bild 4.3) eine sehr weit verbreitete Anwendung in Fernsprechapparaten. Zu den dynamischen Schallwandlern gehört auch das schon weiter oben erwähnte Bändchenmikrofon. Der bewegliche elektrische Leiter übernimmt in diesem Falle gleichzeitig die Funktion der Membran. Er besteht aus einem dünnen, leichten Metallbändchen – meist aus Aluminium – das zwischen den Polen eines Permanentmagneten schwingfähig angeordnet ist.

4.1.3 Magnetostriktive Schallwandler

Bei magnetostriktiven Schallwandlern wird der sogenannte magnetostriktive Effekt ausgenutzt. Danach erfahren Körper aus ferromagnetischem Material (z. B. Nickel) eine Längenänderung, sobald man sie in ein Magnetfeld bringt. Umgekehrt ändert sich die Magnetisierung innerhalb eines ferromagnetischen Körpers, sobald an ihm Kräfte angreifen, die eine Längenänderung verursachen. Umschließt man einen solchen Körper mit einer Spule, so wird in dieser dabei eine elektrische Spannung induziert, deren Höhe ein Maß für die Längenänderung ist.

Die Magnetostriktion eignet sich insofern sehr gut zum Aufbau reversibler Schallwandler. Die relativen Längenänderungen sind dabei allerdings außerordentlich klein $\Delta l/l \approx 10^{-6}$. Dafür können aber die auftretenden Kräfte sehr groß werden. Magnetostriktive Schallwandler finden daher ihren hauptsächlichsten Einsatz im Bereich des Wasserschalls. Dort werden sie im Frequenzbereich zwischen etwa 10 und 500 kHz eingesetzt. Da sie i. a. stets in ihrer mechanischen Eigenfrequenz (= Resonanzfrequenz) betrieben werden, erreicht man mit ihnen (im Wasser!) ungewöhnlich hohe elektroakustische Wirkungsgrade.

Die Magnetostriktion hat physikalisch gesehen eine gewisse Analogie in der Piezoelektrizität. Von der Funktion her jedoch sind die magnetostriktiven Wandler direkt vergleichbar mit den elektromagnetischen Schallwandlern: Die magnetostriktive Längenänderung ist nämlich ebenfalls proportional dem Quadrat der Magnetisierung. Für eine einwandfreie Funktion ist das Vorhandensein einer Gleichfeld-Vormagnetisierung unablässig.

Für den Luftschallbereich haben magnetostriktive Schallwandler keine große Bedeutung.

4.1.4 Elektrostatische Schallwandler

Elektrostatische (oder auch: Dielektrische) Schallwandler sind im Prinzip Kondensatoren, die i. a. aus einer sehr dünnen, schwingfähig gelagerten Membranelektrode und einer starren Gegenelektrode bestehen, siehe Bild 4.4. Legt man an ein solches Kondensatorsystem eine elektrische Spannung u , so entsteht eine Kraftwirkung auf die Membranelektrode, die dem Quadrat

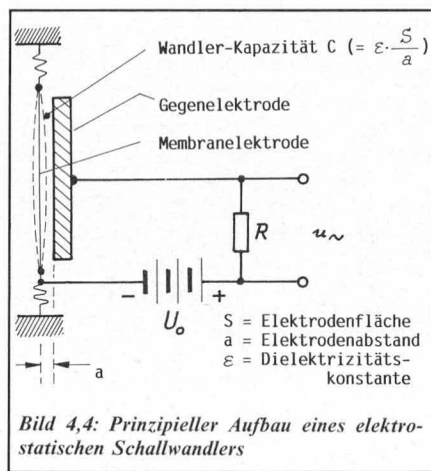


Bild 4.4: Prinzipieller Aufbau eines elektrostatistischen Schallwandlers

der angelegten elektrischen Spannung proportional ist: $F \sim u^2$. D. h. auch hier besteht – ähnlich wie beim elektromagnetischen Wandler – zwischen der erzeugten elektrostatischen Kraft und der sie erzeugenden elektrischen Spannung eine quadratische Beziehung. Um diese zu linearisieren und auf diese Weise das Auftreten von nichtlinearen Verzerrungen zu vermeiden, legt man an die Elektroden der Wandler-Kapazität eine im Verhältnis zur Signal (wechsel-)spannung möglichst hohe Gleichspannung an; man erzeugt damit ein elektrostatisches Gleichfeld, das den quadratischen Einfluß nicht mehr zur Wirkung kommen läßt.

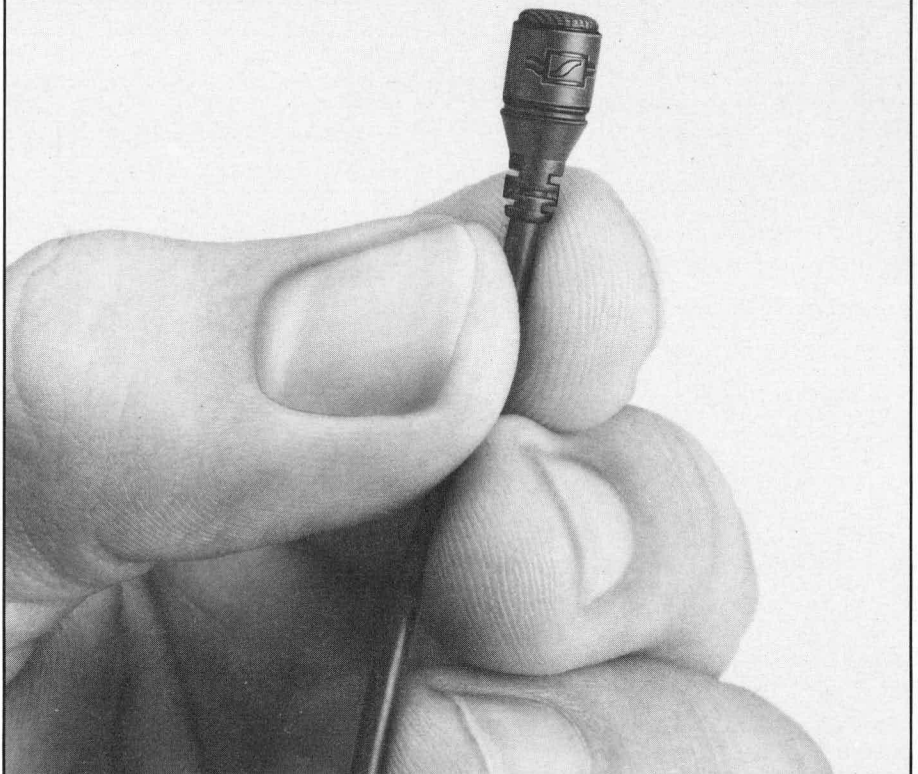
Im Empfangsbetrieb unterscheidet man bei den elektrostatistischen Schallwandlern (= Kondensatormikrofone) grundsätzlich zwei verschiedene Betriebsarten, nämlich a) die Niederfrequenz- oder NF-Schaltung und b) die Hochfrequenz- oder HF-Schaltung.

Über die letztere wird in der nächsten Folge dieser Reihe noch ausführlich berichtet werden. Hier sei zunächst nur die NF-Schaltung betrachtet; in dieser Betriebsart benötigen auch die elektrostatistischen Schallempfänger ein permanentes Gleichfeld. Die Funktion ist folgende: In der Niederfrequenz-Schaltung wird die Wandler-Kapazität C – sie liegt zwischen etwa 10 und 200 pF – über einen Widerstand R (siehe dazu auch das Bild 4.4) auf den Wert der Vor- oder Polarisationsspannung U_0 aufgeladen. Wird das Mikrofon beschallt, so ändert sich im Rhythmus der Schallfrequenz die Mikrofonkapazität C und mit ihr der Strom durch den Widerstand R . Der dadurch hervorgerufene Wechselspannungsabfall an diesem Widerstand (= Mikrofon-Signalspannung u_{\sim}) wird einem nachfolgenden Niederfrequenz-Vorverstärker zugeführt. Damit auch noch sehr tiefe Frequenzen übertragen werden können, müssen der Widerstand R und der Eingangswiderstand R_{Eingang} des Vorverstärkers sehr hochohmig (einige hundert M Ω) sein. Der Vorverstärker war früher i. a. mit Elektronenröhren bestückt; heute übernehmen Feldeffekttransistoren diese Aufgabe.

Zusammenfassend kann daher festgehalten werden: Ohne ein permanentes Gleichfeld arbeiten elektrostatistische Schallwandler – normalerweise – nicht.

Die Bereitstellung der meist doch recht hohen Polarisationsspannung (z. B.: 100 . . . 200 V) ist in der Praxis nicht immer sehr leicht zu bewerkstelligen, z. B. bei extrem kleinen und portabel einsetzbaren Kondensatormikrofonen. In dieser Hinsicht eröffnete die Einführung der Elektret-Technik völlig

Bild 4.5: Hochwertiges Miniatur-Ansteck-Mikrofon Typ MKE 2 (Durchmesser: ca. 6 mm) mit kugelförmiger Richtcharakteristik, das sowohl zur drahtgebundenen als auch drahtlosen Tonübertragung eingesetzt wird. Übertragungsfrequenzbereich: 40 Hz . . . 20 kHz (Werkfoto: Sennheiser electronic).



neue Möglichkeiten. Man konnte nun Kondensatormikrofone bauen, die keine zusätzliche Polarisationsspannung mehr benötigten. Das erforderliche elektrostatische Gleichfeld ist im Elektretmaterial – das sind spezielle Kunststoffe, z. B. Polycarbonate, Polyhalogen-Kohlenwasserstoffe, etc. – permanent „enthalten“. Elektrete lassen sich als dünne Folien herstellen und elektrostatisch polarisieren. Durch besondere Polarisationsverfahren kann man in derartigen Materialien bleibende elektrische Ladungen „einfrieren“. Die Bezeichnung Elektret ist als elektrisches Analogon zum Magneten gewählt worden.

Elektret-Kondensator-Mikrofone lassen sich mit außerordentlich kleinen Abmessungen und dennoch hervorragender Übertragungsqualität herstellen. Bild 4.5 zeigt als Beispiel ein sehr kleines und hochwertiges Ansteck-Elektretmikrofon (Typ MKE 2), wie es gern bei Reportagen oder Diskussionsrunden verwendet wird. Es wird an der Kleidung befestigt und gewährleistet somit einen gleichbleibenden Abstand zwischen dem Mikrofon und dem Mund des Sprechers – unabhängig von dessen Bewegungen. Über die technischen Details von Elektretmikrofonen wird im Teil 5 noch die Rede sein.

4.1.5 Piezoelektrische Schallwandler

Bei den piezoelektrischen Schallwandlern findet der piezoelektrische Effekt seine praktische Anwendung. Dieser Effekt

wurde ursprünglich bei kristallinen Stoffen (z. B.: Quarz, Seignettesalz) beobachtet: Bei mechanischen Deformationen derselben treten an deren Oberfläche elektrische Ladungen auf (= direkter Piezoeffekt); diese Tatsache findet ihre Nutzenanwendung beim Aufbau piezoelektrischer Schallempfänger. Umgekehrt kann man ein solches kristallines Material durch Anlegen einer elektrischen Spannung mechanisch verformen (= reziproker Piezoeffekt); dieser Effekt wird beim Aufbau von piezoelektrischen Schallsendern ausgenutzt. – Heute kennt man neben den piezokristallinen Stoffen auch diverse polykristalline Keramiken (z. B.: Bariumtitanat, Bleizirkonattitanat), die elektrisch polarisierbar sind. Moderne Piezo-Schallwandler sind überwiegend mit piezokeramischen Schwingelementen aufgebaut.

Von der Funktion her unterscheidet man grundsätzlich zwischen dem longitudinalen Piezoeffekt (hier schwingt der Kristall in Richtung des angelegten elektrischen Feldes) und dem transversalen Piezoeffekt (hier schwingt der Kristall quer zur Richtung des angelegten elektrischen Feldes), siehe Bild 4.6a und b. – Die Darstellung des Piezoeffekts ist in diesem Bilde stark schematisiert; Δd bzw. Δl symbolisieren dabei nur die Gesamtänderung der Schwingabmessung in der betreffenden Richtung. Die Kompression bzw. Dilatation tritt stets beidseitig in Erscheinung.

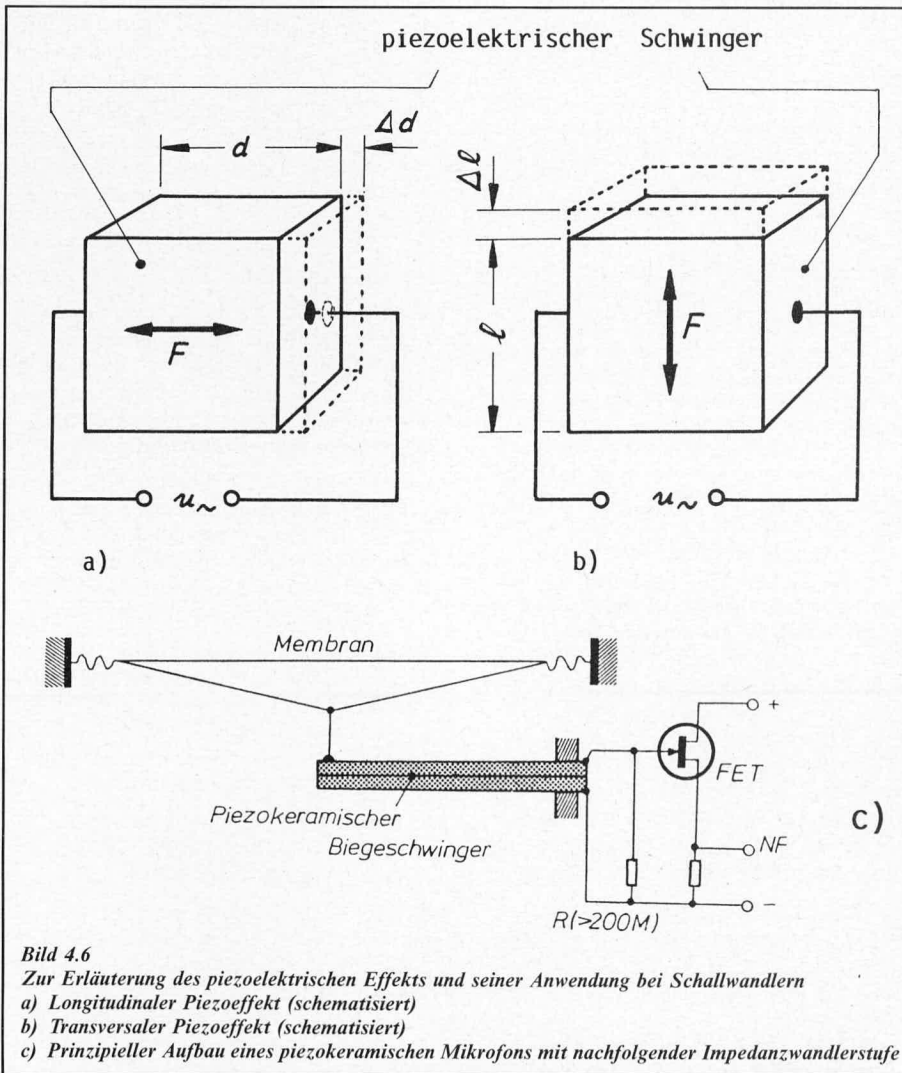


Bild 4.6

Zur Erläuterung des piezoelektrischen Effekts und seiner Anwendung bei Schallwandlern

a) Longitudinaler Piezoeffekt (schematisiert)

b) Transversaler Piezoeffekt (schematisiert)

c) Prinzipieller Aufbau eines piezokeramischen Mikrofons mit nachfolgender Impedanzwandlerstufe

Bild 4.6c zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines piezokeramischen Kleinstmikrofons, wie es u. a. auch bei Hörgeräten eingesetzt wird.

In jüngster Zeit sind die piezoelektrischen Materialien um eine neue Werkstoffvariante bereichert worden. Es handelt sich dabei um ganz bestimmte polarisierbare Kunststoffe. Der bekannteste davon ist das Polyvinylidenefluorid (abgekürzt: PVDF oder PVF₂). Dieses Material läßt sich auch als Folie mit einer Stärke bis zu etwa 10 µm – und kleiner – herstellen, so daß man häufig auch von „Piezopolymerfolien“ spricht. Eine beidseitig metallisierte PVDF-Folie zeigt im Hörfrequenzbereich allerdings nur den transversalen Piezoeffekt (siehe Bild 4.7a). Um damit eine schallwandelnde Wirkung zu erzielen, gibt man der Folie zweckmäßigerweise eine gewölbte Gestalt, so wie das z. B. im Bild 4.7b gezeigt wird.

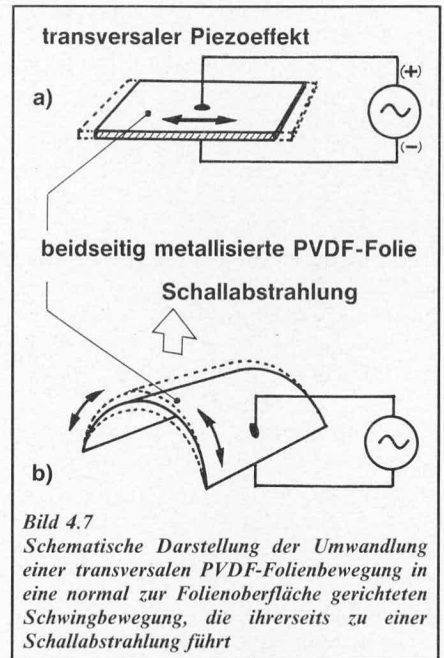


Bild 4.7

Schematische Darstellung der Umwandlung einer transversalen PVDF-Folienbewegung in eine normal zur Folienoberfläche gerichteten Schwingbewegung, die ihrerseits zu einer Schallabstrahlung führt

4.2 Übertragungs-Kenngrößen von Schallwandlern

Zur quantitativen Beschreibung der Übertragungseigenschaften von Schallsendern und -empfängern gibt es eine Reihe von Kenngrößen. Das sind vor allem

- der Übertragungsfaktor bzw. das Übertragungsmaß – und
- die Richtcharakteristik bzw. das Richtdiagramm,

die sowohl von Mikrofonen als auch von Lautsprechern bzw. Kopfhörern gemessen und angegeben werden. Da diese Größen i. a. auch noch frequenzabhängig sind, gibt man davon üblicherweise auch noch die Frequenzgänge an. Darüber hinaus kann es aus verschiedenen Gründen sinnvoll sein, die Übertragungseigenschaften sowohl unter Freifeld- als auch unter Dif-fusfeldbedingungen zu bestimmen. Die einzuhaltenen Meßbedingungen sind in den einschlägigen Normen festgeschrieben.

Über die hier bereits genannten wie auch einige weitere Kenngrößen wird im Rahmen der beiden noch folgenden Beiträge über Mikrofone und Kopfhörer noch ausführlich berichtet werden, und zwar illustriert durch konkrete Beispiele.