

## **Gliederung der Ausarbeitung:**

- o Allgemeine Definition des Begriffs „Schallwandler“
  - Energieumwandlung Schall  $\leftrightarrow$  Spannung
  - allgemeiner Aufbau eines elektromagnetischen Wandlers
  
- o Funktionsweisen verschiedener Mikrofonbauarten
  - Erklärung wichtiger Eigenschaften: Nennimpedanz, Übertragungsfaktor, Übertragungsbereich, Grenzschalldruck
  - Frequenzgang, Richtcharakteristik
  - Erläuterung folgender Bauarten: Kondensator-, Piezo-, Kohle-, -Bändchen- und Tauchspulmikrofon
  - Die Phantomspeisung
  
- o Aufbau und Bauformen von Lautsprechern
  - Schallerzeugung über Konus und Kalotte
  - Vergleich der Impedanz mit Mikrofonen
  
- o Vergleich: Funktionsweise Mikro und Lautsprecher
  - Vergleich der benötigten bzw. gelieferten Leistung
  - Hervorhebung der Ähnlichkeiten im Aufbau

## **Was ist ein Schallwandler?**

Ganz allgemein versteht man darunter ein System, welches Schallenergie in elektrische Energie umwandelt und umgekehrt. Auch ganz allgemein gesehen wird zur Aufnahme bzw. Abstrahlung der Schallwellen ein schwingungsfähiges mechanisches System als Membrane genutzt. Die hier behandelten Wandler sind natürlich alle elektromagnetische Wandler, da elektrische Energie erzeugt bzw. verbraucht wird.

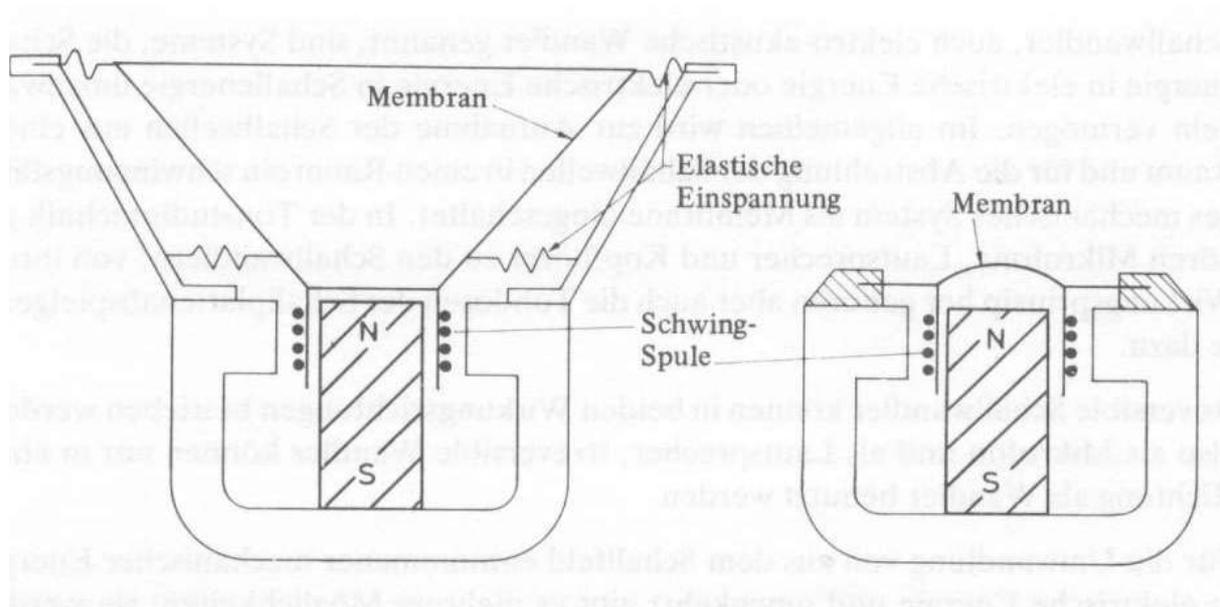


Bild 1: Vergleich der beiden elektromagnetischen Wandler Lautsprecher und Mikrofon

Für dieses Referat sind 2 Wandlertypen interessant: der elektrodynamische und der elektrostatische Wandler.

Der elektrodynamische Wandler besteht aus:

- einem Permanentmagneten
- einer stromdurchflossenen Schwing-Spule, die meist frei beweglich im Feld des Permanentmagneten hängt
- einer Membran, die an die Schwing-Spule gekoppelt ist

Ein Vorteil dieses Wandlertyps ist, dass sich extrem verzerrungsarme Wandler herstellen lassen, da sich die Schwing-Spule auch bei großen Bewegungsamplituden immer im homogenen Magnetfeld des Permanentmagneten befindet.

Es handelt sich hier um einen reversiblen Wandler; er funktioniert in beide Richtungen: sowohl als Mikrofon als auch als Lautsprecher!

Beispiele für diesen Typ: Tauchspul-, bzw. Bändchenmikros und Lautsprecher (quasi alle gängigen Lautsprecher funktionieren auf diese Weise!).

Elemente des elektrostatischen Wandlers:

- eine feste und eine bewegliche Elektrode  $\Rightarrow$  ergeben zusammen einen Kondensator mit veränderlicher Kapazität
- die Membran dieses Typs ist die bewegliche Elektrode
- Mikrofone dieses Typs (Kondensatormikros) benötigen immer eine Spannungsquelle! (siehe unten)

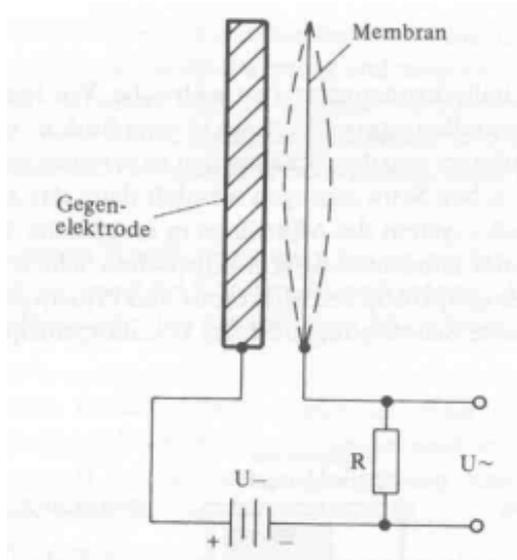


Bild 2:elektrostatischer Wandler; Kondensatormikrofon

Der entstandene Kondensator erhält (siehe Bild 2) eine konstante Vorspannung und eine konstante Ladung. Bewegungen der Membran führen nun zu Kapazitätsänderungen und damit zu Spannungsänderungen an einem Widerstand, der in den Stromkreis aus Spannungsquelle und Wandler gelegt wird. Diese Spannungsänderung ist nun das Ausgangssignal.

Anhand von Bild 2 erkennt man auch gut: Kondensatormikros benötigen eine Vorspannung!

Obwohl auch dieser Typ reversibel ist, wird er hauptsächlich als Wandler von Schallenergie zu elektrischer Energie benutzt, also als Mikrofon. Als Kondensatormikrofon ist dieser Typ das klassische, hochwertige Studiomikrofon schlechthin. Sehr selten wird er als Lautsprecher gebaut.

Der piezoelektrische Wandler soll hier nur am Rande erwähnt werden. Dieser Wandler nutzt den sogenannten piezoelektrischen Effekt: Danach treten an der Oberfläche von bestimmten Kristallen bei Deformation elektrische Ladungen auf. Umgekehrt können diese Kristalle auch durch elektrische Spannungen verformt werden.

Mikrofone mit dieser Funktionsweise sind sehr billig, haben jedoch eine sehr unetliche Frequenzcharakteristik; nehmen also unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich stark auf.

Es sei erwähnt, dass Piezoabnehmer häufig bei E-Gitarren eingebaut werden, da hier ihr unetliches Frequenzspektrum erwünscht ist, denn es simuliert sehr eindrucksvoll den Klang von Westerngitarren. Der Verfasser dieser Zeilen träumt schon lange von so einer Wunderklampfe... :-).

## **Funktionsweisen verschiedener Mikrofonbauarten**

Die Beschreibung der verschiedenen Bauformen und deren Eigenheiten und speziellen Eigenschaften machen die Erklärung mehrerer Begriffe erforderlich. Diese werden auch in der Praxis benutzt, um Mikrofone zu klassifizieren, es handelt sich also nicht um rein theoretische Fachsimplerei!

## Übertragungsfaktor/Empfindlichkeit

Er gibt das Verhältnis von der abgegebenen Spannung und dem einwirkendem Schalldruck an.

Es gibt mehrere Arten von Übertragungsfaktoren, die sich in der Messverfahrensweise unterscheiden. Wichtig für dieses Referat, weil am praxisnähesten, ist jedoch nur der Feld-Leerlaufübertragungsfaktor, auch Empfindlichkeit genannt. Bei diesem Faktor wird die Ausgangsspannung des Mikrofons als Leerlaufspannung (sehr hochohmiger Abschlusswiderstand) gemessen.

Dieser Faktor wird in mV pro Pascal angegeben.

## Übertragungsbereich

Der Übertragungsbereich ist der zur Schallaufnahme nutzbare Frequenzbereich. Für ihn werden die vom Hersteller angegebenen Übertragungseigenschaften und deren Toleranzen angegeben.

Ein typischer Frequenzgang ist z.B. 40Hz bis 20 kHz. Tiefere Frequenzen sind unerwünscht; ebenso die höheren, die ohnehin nicht hörbar sind; jedoch durch Demodulationen (Frequenzgeneration in Schwingkreisen) hörbare Frequenzen stören können.

## Frequenzgang bzw. Frequenzkurve

Beide Begriffe stehen für die grafische Darstellung der Abhängigkeit des Übertragungsmaßes von der Frequenz bei senkrecht auf der Membran auftreffendem (direktem) Schall.

Es sei nur am Rande erwähnt, dass man hier den Einfall von Direkt- und Diffusschall unterscheiden muss. Direktschall erhält man nur in der unmittelbaren Nähe der Schallquelle; entfernt man sich mehr und mehr, erhöht sich der Diffusschallanteil, welcher eine Überlagerung verschiedener Frequenzen darstellt. Für beide Schallarten erhält man u.U. erheblich unterschiedliche Frequenzgänge.

## Grenzschalldruck

Ist der Ersatz des Klirrfaktors bei Mikrofonen. Der Grenzschalldruck bezeichnet denjenigen Schalldruck, unterhalb dessen der Hersteller die Einhaltung eines bestimmten Klirrfaktors (meistens 0,5%) garantiert.

## Nennimpedanz

Darunter versteht man den Wechselstrom-Abschlusswiderstand, für den das Mikrophon ausgelegt ist und mit dem es mindestens angeschlossen werden soll; es stellt die höchste zulässige Belastung dar.

Schließt man also ein Mikro an einen Verstärker an, so muss der Verstärker mindestens diesen Wert als Eingangsimpedanz haben.

### Richtungsfaktor

Dieser Faktor gilt für eine bestimmte Frequenz und die Richtung, unter die der Schall mit dieser Frequenz einfällt. Er ist das Verhältnis des Übertragungsfaktors für eine ebene Schallwelle, die das Mikrofon aus einer bestimmten Richtung trifft, zu demjenigen aus der Bezugsrichtung (Richtung  $0^\circ$ ). Bei  $0^\circ$  ist das Verhältnis also immer eins! Er ist außerdem dimensionslos. Siehe dazu Bild 3.

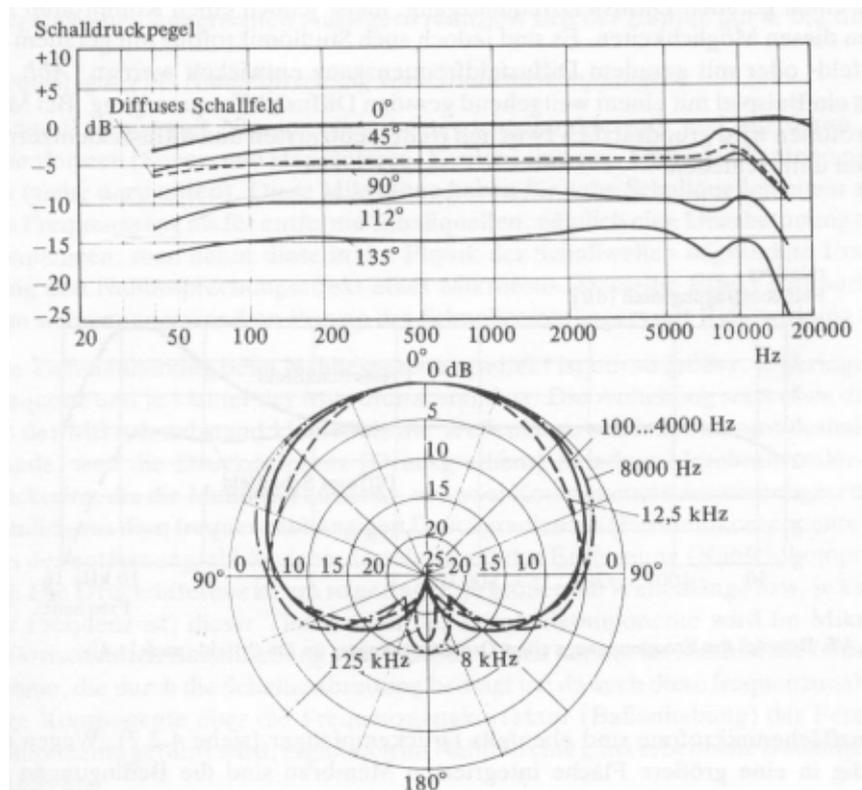
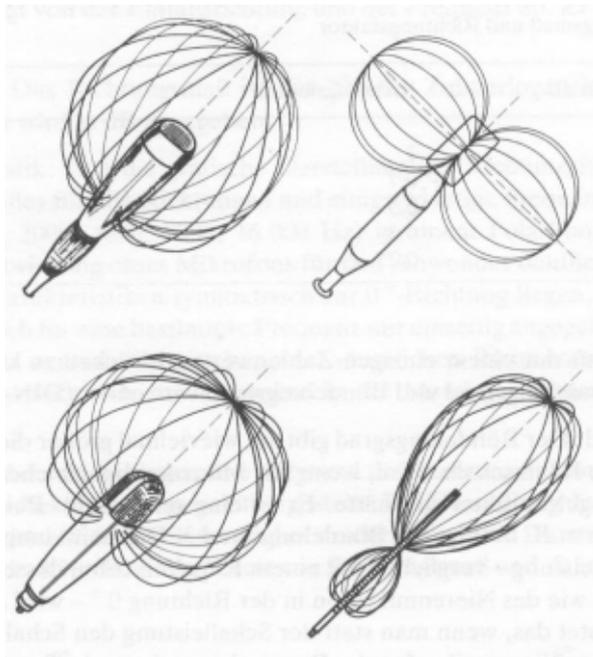


Bild 3: Frequenzgang für verschiedene Einfallswinkel eines diffusen Schallfeldes

### Richtcharakteristik

Dies ist die grafische Darstellung des Richtungsfaktors für alle Richtungen und einige wichtige Frequenzen (z.B. 125, 1000 oder 16000 Hz) in einem Polarkoordinatensystem. Diese Darstellung ist grundlegend für die Benutzung und Wirkungsweise eines Mikrofons! Die Richtcharakteristik stellt die Empfindlichkeit gegenüber einiger Frequenzen und deren Einfallswinkeln dar. Siehe dazu Bild 4.



In Bild 5 sind grundlegende Richtcharakteristiken dargestellt. Zur Veranschaulichung stelle man sich das Mikrofon von der Seite vor. Die Mitte des Mikrofonkopfes ist der Ursprung des Polarkoordinatensystems; und jetzt kann man räumlich erkennen, unter welchem Winkel wie Frequenzen aufgenommen werden. Bspw. Niere: Im Bild 5 in der Mitte oben, auf Bild 4 unten links zur Veranschaulichung in 3D.

Bild 4: Grundformen der Richtcharakteristik

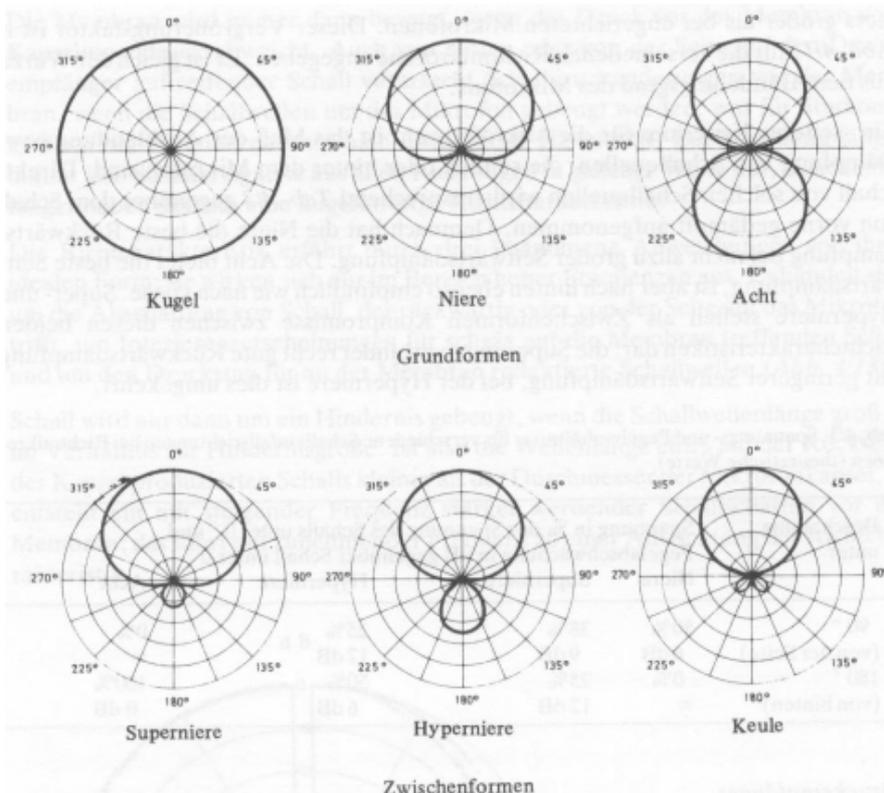


Bild 5: Richtdiagramme von Mikrofonen

Kommen wir nun zu den verschiedenen Bauformen:

### Das Kohlemikrofon

Das Kohlemikrofon wandelt Schall in Widerstandsänderungen. Es ist im Prinzip ein von Gleichstrom durchflossener, veränderbarer Widerstand, dessen Ruhewert sich unter dem Einfluss der Membranbewegung ändert. Als Widerstandstoff wird Kohlegrieß verwendet. Er liegt zwischen zwei Elektroden, der Kontaktplatte und der ebenfalls elektrisch leitenden Membran. Die Beschallung der Membran ergibt einen Wechselstrom, der dem Ruhegleichstrom überlagert ist, wenn man an das Mikro eine

Spannung legt. Die Signalspannung wird dem Stromkreis an einem Widerstand entnommen.

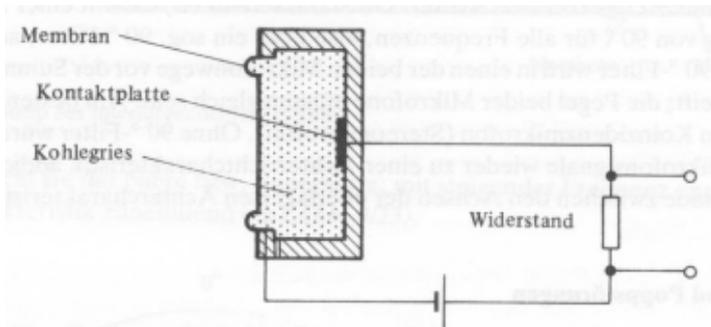
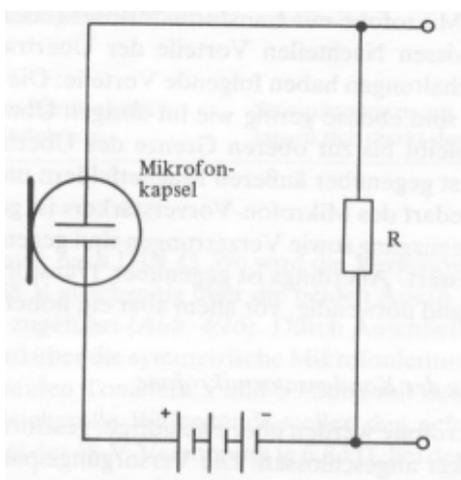


Bild 6: Prinzip des Kohlemikrofons

Das Kohlemikrofon hat einen schlechten Frequenzgang und ist nicht für Studioaufnahmen geeignet. Erwähnt werden soll es hier nur, weil wir es täglich nutzen: In so gut wie jedem Telefon sind Kohlemikrofone enthalten! Der schlechte Frequenzgang erzeugt hier den „typischen“ Telefonsound.

### Das Kondensatormikrofon

Der bei weitem vor allem im Tonstudio eingesetzte Mikrofontyp ist das Kondensatormikrofon (auch elektrostatisches Mikrofon, siehe auch Abschnitt „der elektrostatische Wandler“). Bei ihm wirken eine Membran und eine feste Gegenelektrode zusammen als Kondensator, dessen Kapazität sich entsprechend der Schwingungen der Membran ändert. Wie wir wissen, ist  $C = \epsilon \cdot A / d$  (vereinfacht ein Plattenkondensator). Ändert sich also der Abstand  $d$  der Platten, ändert sich die Kapazität. Ändert sich die Kapazität, so muss ein Ausgleichsstrom fließen, der wiederum ergibt das resultierende Signal, was verwertet werden kann. Wichtig bei diesem Mikrofontyp ist die Dünne der Membran, oft eine Metallfolie oder eine metallbedampfte Kunststofffolie mit einer Dicke von 1 bis  $10\mu\text{m}$ . Der Abstand zur der festen Gegenelektrode beträgt ca. 5 bis  $50\mu\text{m}$ .



Vorteile dieses Mikrofontyps: ein weitgehend frequenzunabhängigen Übertragungsfaktor, sowie geringe Verzerrungen. Wieder wichtig zu Erwähnen: Zur Erhaltung der Ladung des Kondensators benötigt man eine Betriebsspannung! Dies ist in der Praxis jedoch unproblematisch, siehe dazu den Abschnitt „Die Phantomspannung“.

Bild 7: Prinzip des Kondensatormikrofons

Wichtig für das Verständnis des Kondensatormikros ist folgende Betrachtung: Nach Bild 7 stellt ein solches Mikro einen Hochpass dar. Da der Frequenzbereich bei 40 Hz beginnt, muss die Grenzfrequenz des Hochpasses unterhalb davon liegen. Bei einer Kapazität von 20 bis 100 pF – je nach Mikrofontyp – muss der Widerstand einen Wert zwischen 400 und 80 M $\Omega$  haben. Ein solch hochohmige Quelle kann an keine längere elektrische Leitung angeschlossen werden, deshalb befindet sich in jedem Kondensatormikro ein Vorverstärker, der in erster Linie den Innenwiderstand herabsetzt, aber auch den Pegel anheben kann. Die Speisespannung dafür wird meist über das Mikrofonkabel geliefert, selten mit einem externen Netzteil.

### Dynamische Mikrofone 1: allgemeine Eigenschaften

Diese Mikrofone beruhen in ihrer Arbeitsweise auf dem Induktionsgesetz. Dabei wird in einem durch einen Permanentmagneten erzeugten magnetischen Feld eine Leiterschleife von den Schallwellen (Bändchenmikro) oder eine kleine Spule (Tauchspulmikro) von der Membran bewegt.

Dynamische Mikrofone im allgemeinen benötigen keine Speisespannung und sind robust, sie arbeiten auch bei hohen Lautstärken verzerrungsarm.

Verglichen mit dem Kondensatormikro ergeben sich folgende Fakten:

- Die Struktur des Frequenzgangs bei Tauchspulmikros ist unregelmäßiger
- Ein Phasenfrequenzgang ist unvermeidlich (Induktion!)
- Wegen der im Vergleich viel größeren (ca. 20mal) bewegten Masse von Membran und Schwingspule ist das Einschwingverhalten beim Tauchspulmikro langsamer; bei hohen Qualitätsanforderungen werden deswegen Kondensatormikros bevorzugt

### Dynamische Mikrofone 2: Das Tauchspulmikrofon

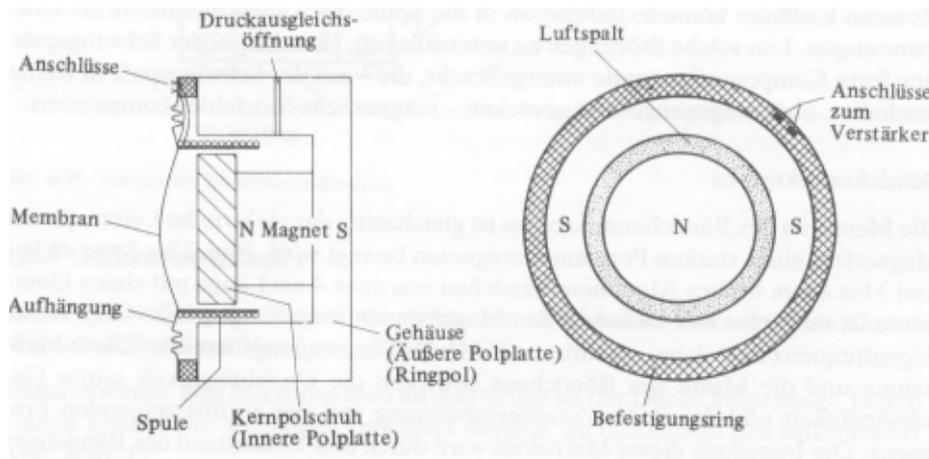


Bild 8: Prinzip des Tauchspulmikros

An der Membran ist eine Spule befestigt, welche in den Luftspalt eines Topfmagneten eintaucht; dieser besteht aus einem Dauermagneten und einem Topf aus magnetisch leitendem Material (äußere Polplatte) und dem Kernpolschuh, siehe dazu Bild 8.

Die Spule ist ohne Körper gewickelt und erhält ihre mechanische Steifigkeit dadurch, dass ihre einzelnen Windungen miteinander verklebt sind. Sie ist meist so bemessen, dass ihre Impedanz bei 1000Hz  $200\Omega$  beträgt.

Die Größe der Signalspannung ist abhängig von der magnetischen Induktion, von der Dimensionierung der Spule und von der Geschwindigkeit, mit der die Spule im Magnetfeld bewegt wird.

Auf dem Markt erhältlich sind vor allem Mikros mit Nieren-, Hyper- oder Supernierencharakteristik. Nach jahrelanger Erfahrung ist der mechanischen Aufbau ausgereift, und es gibt sowohl preiswerte als auch solche mit hohem Qualitätsstandard.

### Dynamische Mikrofone 3: Das Bändchenmikrofon

Die Membran des Bändchenmikrofons ist gleichzeitig der elektrische Leiter, der im Magnetfeld eines starken Permanentmagneten bewegt wird. Eine 2 bis  $3\mu\text{m}$  dickes und 3 bis 5mm breites Aluminiumbändchen von etwa 4cm Länge mit vielen Querfalten ist möglichst lose zwischen den Magnetpolen aufgehängt, siehe Bild 9. Seine Eigenfrequenz liegt bei dabei am unteren Ende des Übertragungsbereiches. Diese Maßnahme und die Masse des Bändchens bewirken die Unabhängigkeit seiner Geschwindigkeit und damit der Ausgangsspannung von der zu übertragenden Frequenz. Die Impedanz wird durch den Widerstand des Bändchens bestimmt und würde ca.  $0,1\Omega$  betragen. Ein im Mikrofongehäuse untergebrachter Übertrager erhöht die Impedanz auf meist  $200\Omega$ . Damit wird gleichzeitig die Ausgangsspannung erhöht.

## Die Phantomspannung

Die Phantomspannung wird für die verlustarme Übertragung von Audiosignalen benutzt; des weiteren ist sie eine elegante Art, die von Kondensatormikros benötigte Betriebsspannung zur Verfügung zu stellen.

Bei dieser Speisung benötigt man zwangsweise ein Stereokabel mit Abschirmung (also ein Kanal, der auf Masse liegt), also ein Kabel mit 3 Leitungen. Oft werden dazu sogenannte XLR Kabel benutzt; aber auch übliche Stereoklinken sind einsetzbar.

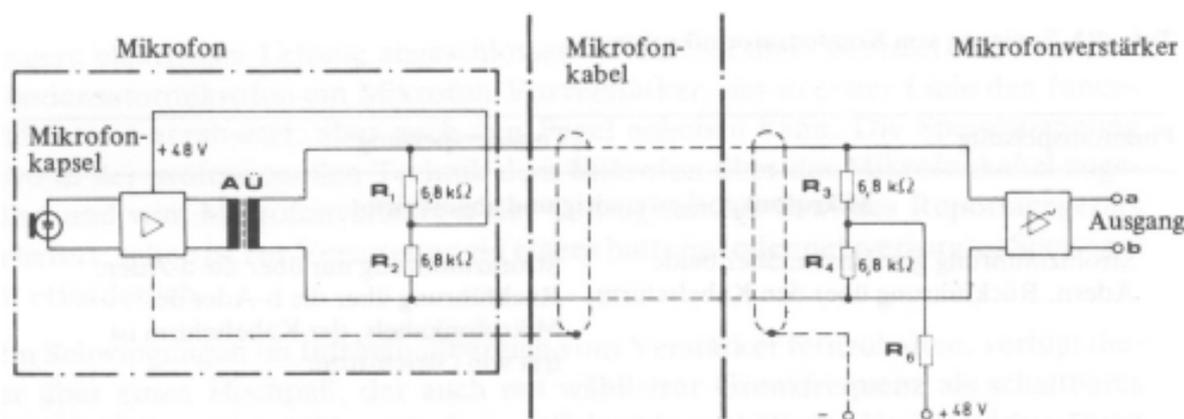
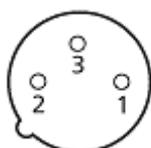


Bild 10: Prinzip der Phantomspannungsversorgung

Wichtig für das Verständnis dieser Versorgung ist noch das Prinzip der Übertragung von *symmetrischen* Signalen. Dabei wird ein zu übertragendes Signal genau gegenphasig (also Phasenverschiebung  $180^\circ$ ) auf 2 Adern aufgeteilt und synchron übertragen; würde man also nun beide Signale wieder zusammenführen, würden sie sich zu null auslöschen. Sinn macht dies bei genauerer Betrachtung bei Einfall von Störsignalen auf das gegenphasig übertragene Signal: ein Störsignal wird auf beiden Adern, die ja eng nebeneinander verlaufen, gleich stark auftreten.

Wird nun das Signal am Ende des Kabels, z.B. durch eine invertierende OP Schaltung (diese dreht das Signal ja um  $180^\circ$  - es kehrt wieder eine Hälfte des Signals um und addiert diese auf die 2te, nicht phasenverkehrte Hälfte), so werden diese Störungen herausgefiltert: Denn da ja auch eine Hälfte das Störsignals um  $180^\circ$  gedreht wird, entsteht bei der genannten invertierenden OP Schaltung eine zu verstärkende Differenzspannung von  $0V$ ; das Störsignal wurde also eliminiert.



- 1 – Masse
- 2 – + Phase
- 3 – - Phase

Bild 10: Belegung eines XLR Steckers

Nun zur Funktionsweise: über die beiden Stereoadern wird nun der positive Pol der Speisespannung - +48V – über zwei Speisewiderstände auf beide Adern gegeben; die Stromrückführung erfolgt über den Kabelschirm. Dabei fließen bei aktuellen Mikros bis zu 10 mA.

Bedenkt man, dass wie oben erklärt, das Signal symmetrisch über die beiden Adern a und b übertragen wird (beide haben ja dasselbe Potential), so hat der Eingang des Mikrofonverstärkers eine maximale Differenzspannung. Störungen im symmetrischen Signal sind ja noch gleichphasig und löschen sich somit über den Widerständen R1 und R2 aus.

Eigenschaften der Phantomspeisung:

- Keine Gleichspannung zwischen den Adern des Mikrofonkabels und keine Probleme beim Anschluss dynamischer Mikrofone (wegen der Schwingspule träten Probleme auf)
- Hohe Störuneempfindlichkeit ggü. Schwankung der Betriebsspannung bzw. Einstreuung von Störsignalen ins Kabel
- Man benötigt einen symmetrischen Eingang am Verstärker
- Stromzuführung über beide Adern (je zur Hälfte), Stromrückführung über Kabelschirm

## **Aufbau und Bauformen von Lautsprechern**

### Verwendung des elektrodynamischen Prinzips

Die beiden hier vorgestellten Bauformen, Konus und Kalotte, basieren beide auf demselben Prinzip der dynamischen Schallerzeugung; d.h. sie benutzen Schwingspulen, die elektrische Spannungen in Schall wandeln.

### Der Konuslautsprecher

Vgl. Bild 11 für die Bedeutung der verwendeten Zahlen!

Bild 11 zeigt den Querschnitt durch einen Konuslautsprecher, der seinem Namen der konisch geformten Membran (10) verdankt. Die konische Form gibt der Membran die erforderliche Steifigkeit. Der Topfmagnet besteht aus dem Permanentmagneten (1), dem Joch (3), der Polplatte (3) und dem Polkern (4). Im Luftspalt, gebildet durch den Polkern und Polplatte, befindet sich die auf den Schwingspulenträger (5) gewickelte Schwingspule (6), die von dem tonfrequenten Wechselstrom durchflossen wird. Hierdurch wird in der Spule ein magnetisches

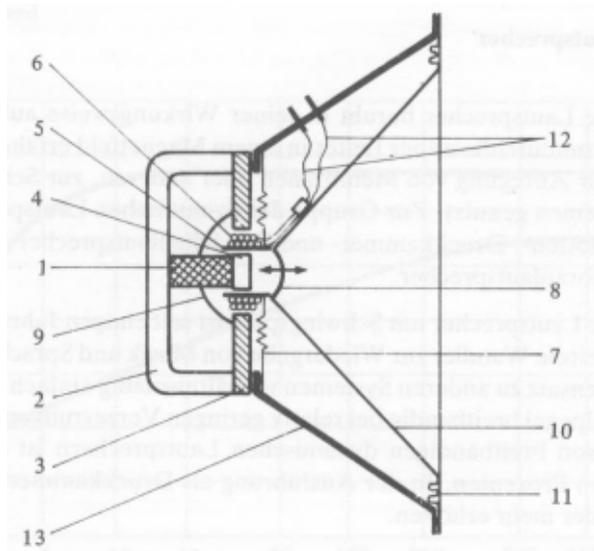


Bild 11: Querschnitt der Konuslautsprechers

Wechselfeld erzeugt, das im Zusammenwirken mit dem permanenten Gleichfeld im Luftspalt eine Bewegung der Schwingspule analog der Wechselfeldspannung in Pfeilrichtung zur Folge hat. Die Schwingspule wird durch die Zentrirmembran (7), eine radial steife, aber axial sehr weiche und nachgiebige Federmembran geführt und in der Ruhelage gehalten.

Die meist aus dünnem Pappenguss, teils aus Kunststoffen oder Aluminium, auch in Sandwichbauweise geformte Membran (10) ist mit dem Schwingspulenträger fest verbunden und am äußeren Rand über konzentrisch verlaufende Sicken (11) oder über einen weichen Balg aus hochelastischem Material im Lautsprecherkorb (13), der mit großen Durchbrüchen versehen ist, eingespannt. Eine Staubschutzkalotte (8) und der Schutzring (9) verhindern das Eindringen von Schmutz in den Luftspalt. Über die sehr weichen Litzen (12) wird der Wechselstrom der Schwingspule zugeführt.

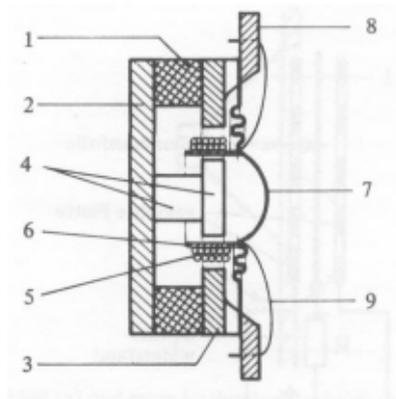
### Frequenzverhalten des Konuslautsprechers

Der Frequenzbereich des abgestrahlten Schalls ist nach tiefen Frequenzen hin durch die Resonanzfrequenz der kolbenförmig schwingenden Membran begrenzt. Man legt daher diese Resonanzfrequenz (Eigenresonanz des Lautsprechers) an das untere Ende des Übertragungsbereiches. Dies wird u.a. durch eine sehr weiche Membraneinspannung ermöglicht.

Bei mittleren und höheren Frequenzen schwingt die Membran nicht mehr in ihrer Gesamtheit. Die Schwingspule regt vielmehr konzentrische Biegeschwingungen an, die vom Membranrand teilweise reflektiert werden, und so bildet sich eine komplizierte Schwingungsverteilung aus. Dabei entstehen kreisförmige Knotenlinien zwischen ringförmig schwingenden Zonen. Dies wirkt sich ungünstig auf den Frequenzgang bzw. auf die Richtcharakteristik aus. Bei sehr hohen Frequenzen schwingt praktisch nur noch die innere Membranzone. Man begünstigt dies durch eine zum Rand hin dünner werdende Membran oder durch eine spezielle Formgebung.

## Der Kalottenlautsprecher

Dieser Lautsprechertyp entspricht im wesentlichen hinsichtlich Aufbau und Funktion dem Konuslautsprecher, nur fehlen Korb und Konusmembran. Der Schall wird lediglich über die Kalotte abgestrahlt. Siehe dazu Bild 12.



Die Kalotte mit angespressten Sicken (7) ist aus hinreichend steifen Material mit hoher innerer Dämpfung hergestellt. Ihr Durchmesser ist in den meisten Fällen kleiner als die zu übertragende Wellenlänge.

Bild 12: Querschnitt Kalotte

## Frequenzverhalten des Kalottenlautsprechers

Die Kalotte schwingt im gesamten Übertragungsbereich kolbenförmig, Partialschwingungen (wie für den Konuslautsprecher vor allem in den Höhen, vgl. letzten Abschnitt) treten praktisch nicht mehr auf. Die Abstrahlung erfolgt in einem breiten Winkelbereich gleichmäßig.

Kalottenlautsprecher werden deshalb bevorzugt als Hochtonlautsprecher bei einem Kalottendurchmesser von etwa 20 bis 25 mm eingesetzt. Aber auch für den Mitteltonbereich bis hinunter zu 400 Hz eignen sich Kalottenlautsprecher mit etwa 60mm Kalottendurchmesser. Wegen der relativ kleinen Abmessungen der schwingenden Membran und der großen Luftspaltlänge sind besonders starke Permanentmagnete zur Erzeugung einer großen Luftspaltinduktion notwendig, um einen den Konuslautsprechern entsprechenden Wirkungsgrad zu erzielen.