

Die Entwicklung der Lautsprecher

Prof. Dr.–Ing. Dietmar Rudolph

13. Dezember 2012

Zusammenfassung

Dargestellt wird die technische Entwicklung der Lautsprecher-Systeme. Ursprünglich hatte man nur Kophörer zur Verfügung. Diese entwickelten sich ausgehend von den Telefonhörern.

Daneben gab es akustische Grammophone, die Trichter verwendeten, um das von der Schellack-Platte abgetastete Schallsignal zu „verstärken“. Tatsächlich verstärkt der Trichter den Schall nicht, sondern er paßt die Schalldose des Grammophons akustisch an das freie Schallfeld an.

Um eine größere Lautstärke aus einem Kophörer zu gewinnen, lag es nahe, diesen mit dem Trichter eines Grammophons zu koppeln. Hieraus entwickelten sich dann in den '20er Jahren zunächst die Trichter-Lautsprecher.

Die Toqualität dieser Trichterlautsprecher ließ sehr zu wünschen übrig. Sie waren zwar (relativ) laut, aber ziemlich quäkig.¹ Das lag vor allem an dem Antriebssystem, das i.w. eine (etwas größere) Kophörermuschel mit Eisenmembran war.

Verbesserungen waren nötig bezüglich Lautstärke einerseits, ausgeglichenem Frequenzgang und „Tonreinheit“² andererseits. Mit Hilfe der magnetischen Systeme versuchte man diese Mängel zu beheben. Daß dies nur unvollständig gelang ist daran zu erkennen, daß vielerlei magnetische Systeme entstanden sind.

Technisch unterscheiden sich diese magnetischen Lautsprecher speziell darin wie der Magnetanker sich bewegen kann.³

Bei den magnetischen Systemen ist die Erregerspule fixiert und ein eiserner Anker bewegt sich und treibt die Membran.

Man kann aber auch das gesamte Magnetsystem fixieren und die Erregerspule („Schwingspule“) bewegt sich bzw. schwingt und treibt so die Membran an. Hierzu gab es auch verschiedene Lösungsversuche, wobei sich die „Tauchspule“ durchgesetzt hat. Die meisten Lautsprecher heute haben ein System mit Tauchspule.

Zu Beginn der dynamischen Lautsprecher gab es noch keine kräftigen Magneten. Daher hatten diese zur Erzeugung eines konstanten Magnetfeldes eine Erregerspule (Feldspule). Diese wurde mit gleichgerichtetem Wechselstrom gespeist, wodurch sich Brummen im Lautsprecher bemerkbar machte. Das Brummen wurde zunächst dadurch minimiert, daß die elektrodynamischen Lautsprecher entweder eine zusätzliche Spule bekamen, die eine gegenphasige Brummspannung erzeugte, die zur Kompensation diente, oder man brachte einen Kurzschluß-Ring über der Feldspule an, die die Brummspannung kurz schließt. Allerdings war in diesem Fall die Feldspule nicht mehr zur Siebung der Anodenspannung geeignet. Beide Konzepte konnten sich nicht durchsetzen.

Die Kompensation der Brummspannung erfolgt später mit Hilfe einer Brückenschaltung die mit Hilfe einer Anzapfung im Ausgangsübertrager realisiert wird. Damit kann der Lautsprecher entsprechend einfacher aufgebaut werden.

Seit es kräftige Magneten gibt, dominieren die permanentdynamischen Lautsprecher.

Da die Membranen unerwünschte Partialschwingungen ausführen können, ist der Übertragungsbereich der meisten Typen eingeschränkt. Mit Hilfe von Sonderkonstruktionen läßt sich der Frequenzbereich erweitern.

Aus den Trichter-Lautsprechern entwickelten sich die Horn-Lautsprecher, die als Hochtöner oder als Durchsage-Lautsprecher („Bahnhofs-Lautsprecher“) verwendet werden.

Sonderformen von Lautsprechern sind Elektrostaten, Piezo-Lautsprecher und Ionen-Lautsprecher.

¹Ein bekannter Musiker fühlte sich an „Bronchial-Katarrh“ erinnert.

²Die frühen Lautsprecher neigten zu Resonanz-Spitzen und zu nichtlinearen Verzerrungen.

³Der „Freischwinger“ ist nur einer dieser Typen. Er ist allerdings recht verbreitet, weil viele Volksempfänger diesen Typ eingebaut hatten.

Inhaltsverzeichnis

1	Vom Telefonhörer zum Kopfhörer	1
2	Vom Kopfhörer zum Trichterlautsprecher	2
3	Alternative Schallwandler	4
4	Antriebssysteme für Lautsprecher	6
4.1	Magnetische Systeme	6
4.2	Das AEG-System	7
4.3	Das Induktor-Dynamische System	7
4.4	Das Freischwinger-System	7
4.5	Das Elektrodynamische Tauchspulen-System	9
4.6	Permanent-Dynamische Lautsprecher	9
4.7	Bandlautsprecher und Blatthaller	10
5	Membran-Lautsprecher	11
5.1	Die Elektrodynamischen Lautsprecher	11
5.1.1	Die Stromversorgung des elektrodynamischen Lautsprechers	12
5.1.2	„Hum Bucking“ und „Shading Ring“	12
5.2	Die Permanentdynamischen Lautsprecher	13
5.3	Befestigung der Membran	14
5.4	Knick- und Partialschwingungen der Membran	15
5.4.1	Richtungsabhängigkeit	16
5.5	Breitband-Lautsprecher	16
5.6	Lautsprecher-Kombinationen	17
5.7	Sonderformen von Membranen	19
6	Horn-Lautsprecher	20
6.1	Die Erregersysteme für Horn-Lautsprecher	21
7	Sonderformen	23
7.1	Elektrostatische Lautsprecher	23
7.2	Kristall-Lautsprecher	23
7.3	Ionen-Lautsprecher	24

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bell–Telefonhörer im Schnitt	1
1.2	Telefonhörer mit Hufeisenmagnet im Schnitt	1
1.3	Kopfhörer Konstruktion	1
2.1	Ankopplung von Kopfhörer an einen Trichter	2
2.2	Typische Form eines Trichter–Lautsprechers	2
2.3	Beispiele für die Antriebssysteme von Trichter–Lautsprechern	3
2.4	Typische Frequenzgänge von Lautsprechern	3
3.1	Kuriose Arten der Schallwandlung	4
3.2	Prinzip und Konstruktion eines Johnsen–Rahbek Lautsprechers	4
3.3	Realisierter Johnsen–Rahbek’scher Lautsprecher	5
3.4	Motor–Lautsprecher	5
3.5	Luftdruck–Lautsprecher	5
4.1	Antriebssysteme für magnetische Lautsprecher	6
4.2	Zungen–Systeme für magnetische Lautsprecher	6
4.3	Vierpoliges System Prinzip und perspektivische Darstellung	6
4.4	Prinzip und Schnitt des AEG Gealion Lautsprechers mit Tiefenkomensation	7
4.5	Das Induktor–Dynamische System	7
4.6	Prinzip eines Freischwinger–Systems	8
4.7	Freischwinger–System als vereinfachtes Vierpol–System	8
4.8	Freischwinger–System des VE301 (links) und „Kraft–Freischwinger“ (rechts)	8
4.9	Schnittbild des Magnavox elektrodynamischen Systems	9
4.10	Schnittbild eines elektrodynamischen Lautsprechers	9
4.11	Schnitt durch einen modernen permanent–dynamischen Lautsprecher	9
4.12	Prinzip des Bändchen–Lautsprechers	10
4.13	Prinzip des Blatthallers	10
5.1	Schnitt durch einen elektro–dynamischen Lautsprecher	11
5.2	Explosionsdarstellung eines elektro–dynamischen Lautsprechers	11
5.3	Zur Felderregung eines elektro–dynamischen Lautsprechers	12
5.4	Elektro–dynamischer Lautsprecher mit Netzteil zur Felderregung.	12
5.5	Elektro–dynamischer Lautsprecher mit Hum–Bucking	13
5.6	Elektro–dynamischer Lautsprecher mit Hum–Bucking	13
5.7	Permanent–dynamischer Lautsprecher im Schnitt und perspektivische Ansicht.	13
5.8	Explosionsdarstellung eines permanent–dynamischen Lautsprechers	14
5.9	Innere Zentrierspinne eines dynamischen Lautsprechers	14
5.10	Ältere Formen von Zentrierspinnen	14
5.11	Äußere Befestigung der Membran	15
5.12	NAWI–Membran	15
5.13	Beispiele für Partialschwingungen	15
5.14	Beispiel des Frequenzgangs eines (eingebauten) Lautsprechers	16
5.15	Beispiel der Richtwirkung eines Lautsprechers in Abhängigkeit der Frequenz	16
5.16	Winkelabhängigkeit des Frequenzgangs	16
5.17	Typische Formen von Membranen	17
5.18	Breitband–Lautsprecher mit unterteilter Membran	17
5.19	Tiefton–Lautsprecher mit vorgesetztem Hochton–Lautsprecher	18
5.20	Tiefton–Lautsprecher mit Hochton–Kegel	18
5.21	Tiefton–Lautsprecher mit Hochton–Kalotte	18
5.22	Tiefton–Lautsprecher mit Hochton–Kegel	18
5.23	Koaxial–Lautsprecher	19
5.24	Lautsprecherweichen	19
5.25	Ovaler und runder Lautsprecher	19
5.26	Membran eines Falz–Lautsprechers	19
6.1	Der Übergang vom Trichter zum Horn–Lautsprecher	20
6.2	Moderne Formen des gefalteten Horn–Lautsprechers	20
6.3	Prinzipielle Bestandteile eines Horn–Lautsprechers	20
6.4	Schnitt eines Horn–Lautsprechers	20

6.5 Untere Grenzfrequenz eines Horn–Lautsprechers 21

6.6 Grenzfrequenz abhängig von der Form des Horns 21

6.7 Erregersystem mit Ringmembran 21

6.8 Erregersystem mit (inverser) Kalottenmembran 21

6.9 Vierpolige magnetische Erregersysteme von Trichter–Lautsprechern 22

6.10 Trichter–Megaphon in den '20er Jahren. 22

7.1 Prinzip des elektrostatischen Lautsprechers 23

7.2 Antriebsysteme von Kristall-Lautsprechern 23

7.3 Antrieb der Membran beim Sattelbieger 24

7.4 Prinzip des Ionen–Lautsprechers 24

1 Vom Telefonhörer zum Kopfhörer

Die früheste Anwendung eines elektromechanischen Wandler für Schall ist beim Telefon entstanden und wurde da als „Fernhörer“ bezeichnet. In Bild 1.1 ist die Ausführung von Alexander Graham Bell dargestellt.*¹

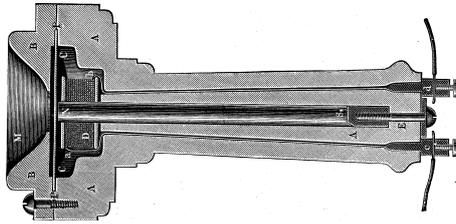


Bild 1.1: Bell-Telefonhörer im Schnitt

Der Bell'sche Fernhörer hatte noch einen Stabmagneten. Eine naheliegende Verbesserung war, statt dessen einen Hufeisenmagneten zu verwenden, Bild 1.2, was die magnetische Kraft auf die Stahl-Membran — und damit auch die Lautstärke — erhöhte.

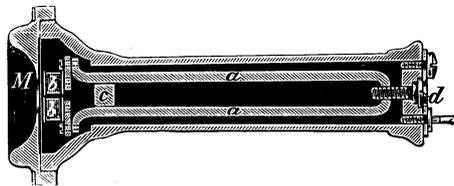


Bild 1.2: Telefonhörer mit Hufeisenmagnet im Schnitt

Eine Verbesserung gegenüber dem Bell'schen System war die Aufteilung von Fernhörer und Mikrofon in extra Einheiten.*² Der Fernhörer brauchte nun keinen „Handgriff“ mehr zu haben, entsprechend zu dem Bell'schen Modell. Somit ergaben sich nun Formen, die sich auch für einen Kopfhörer*³ eigneten, wie in Bild 1.3 ein Beispiel zeigt.

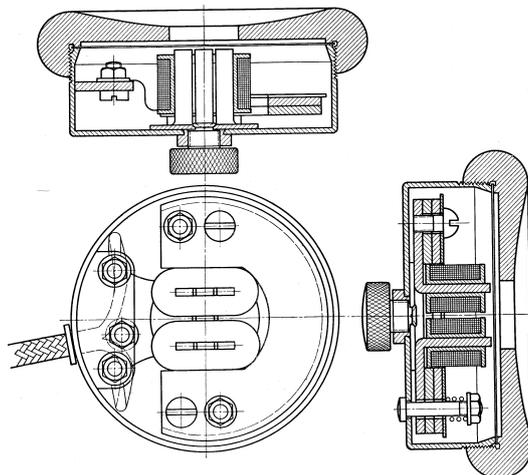


Bild 1.3: Kopfhörer Konstruktion; mit Einstellvorrichtung für den Abstand zur Membran

*¹Beim Bell'schen Telefon wurde der Fernhörer auch als Mikrofon benutzt, was beim Telefonieren einen „Halb-Duplex“ Betrieb ergab.

*²Als Mikrofon wurde eine Anodnung verwendet, bei der eine Membran Kohlegrieß im Rhythmus des Schalls verdichtete und verdünnte, wodurch sich dessen Widerstand entsprechend veränderte (Kohlemikrofon). Der Telefon-Kreis benötigte nun aber eine Batterie. Als Vorteil ergab sich nun ein „Voll-Duplex“ Betrieb.

*³In der historischen Radio-Literatur als „Doppel-Kopfhörer“ bezeichnet, wenn 2 Hörmuscheln vorhanden waren.

Bei unmittelbar am Ohr anliegenden Schallwandlern kommt man mit geringsten Leistungen aus. Einige μW genügen hierfür.^{*4} Zum Empfang mit dem Detektor genügte daher ein Kopfhörer vollständig. Aber man ist „verkabelt“ und kann sich nicht frei bewegen. Auch ist es umständlich und unbequem, wenn dann mehrere Personen gleichzeitig etwas hören wollen. Der Wunsch nach einem Lautsprecher kam daher schon recht früh auf.

2 Vom Kopfhörer zum Trichterlautsprecher

Was unmittelbar am Ohr recht laut klingt, ist in einigem Abstand kaum noch richtig zu hören, weil erstens die Lautstärke gering ist, aber zweitens sind fast nur noch hohe Töne wahrnehmbar. Als Abhilfe oder „Notlösung“ kann ein Trichter an eine Muschel eines Kopfhörers angekoppelt werden. Das waren tatsächlich die ersten Versuche, zu einem „lautsprechenden Telefon“ zu kommen, Bild 2.1 rechts.

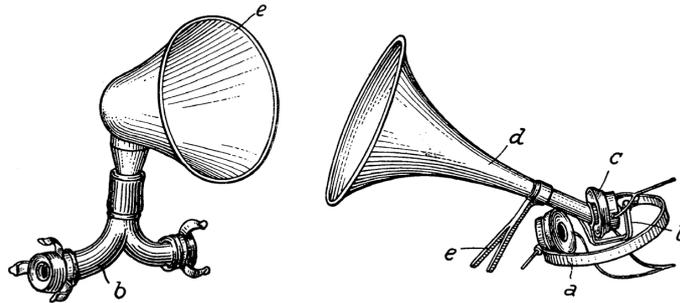


Bild 2.1: Ankopplung von Kopfhörer an einen Trichter; links: für Doppelkopfhörer; rechts: provisorisch an eine Hörkapsel

Wird die Hörkapsel in einen Fuß eingebaut, entsteht daraus der damals typische Trichter-Lautsprecher, Bild 2.2.

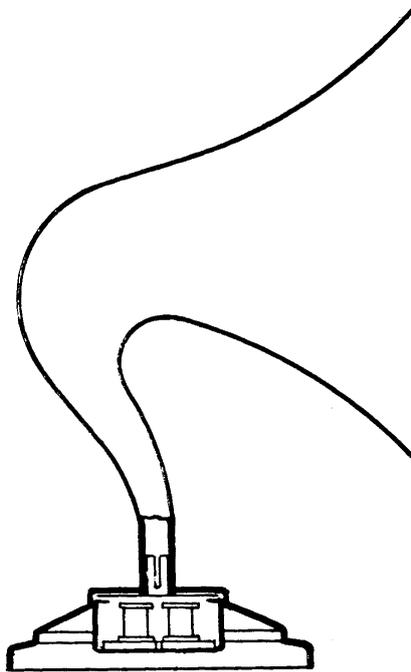


Bild 2.2: Typische Form eines Trichter-Lautsprechers

Die im Fuß des Trichters eingebaute Hörkapsel ist i.a. etwas größer und damit auch leistungsfähiger als eine Hörkapsel eines

^{*4}Jeder, der schon mit „Stöpseln“ oder „Schmalzbohrern“ im Ohr Erfahrung hat, sollte wissen, daß Leistungen im mW Bereich bereits zu Hörschäden führen können. „Aus dem Hörer zischt es grell — den Nachbarn juckt's im Trommelfell“. (U-Bahn München)

Kopfhörers. Allerdings kann man diese Hörkapsel nicht beliebig groß machen, weil die Membran dann die höheren Töne nicht mehr richtig wiedergeben kann.

Aus diesem Grunde gab es modifizierte Antriebssysteme für Trichterlautsprecher, wie in Bild 2.3 an zwei Beispielen gezeigt wird.

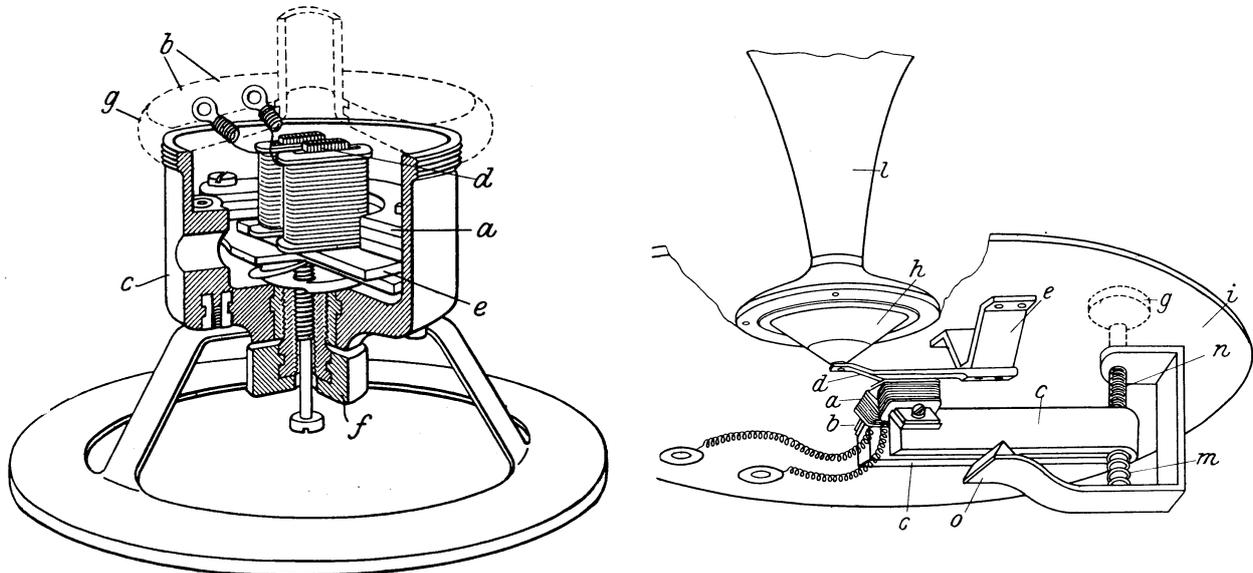


Bild 2.3: Beispiele für die Antriebssysteme von Trichter-Lautsprechern

Die Spulen dieser Systeme sind hochohmig und bestehen aus vielen Windungen sehr dünnen Drahtes. Man kann diese Trichter-Lautsprecher deshalb unmittelbar in die Anodenleitung der Endröhre legen, also ohne Zwischenschaltung eines Ausgangsübertragers. Die damals typische Lautsprecher-Röhre (z.B. RE144, RE134, RES164) hatte einen Anodenstrom von ca. 10 — 12 mA.^{†1} Der Anodenstrom führt zu einer Vormagnetisierung, wodurch die Membran angezogen, d.h. durchgebo-gen wird.^{†2} Um genügend Lautstärke zu erhalten, muß der Abstand zwischen Magnet und Membran einjustiert werden. Daher haben Trichterlautsprecher stets eine entsprechende Einstellmöglichkeit. In Bild 2.3 ist das links die Schraube in der Mitte unten und rechts die mit *g* bezeichnete Schraube.

Trichter-Lautsprecher können eine beachtliche Lautstärke entwickeln, haben jedoch nur einen eingeschränkten Frequenz-gang, der für den „Trichter-Klang“ verantwortlich ist, Bild 2.4, Kurve b).

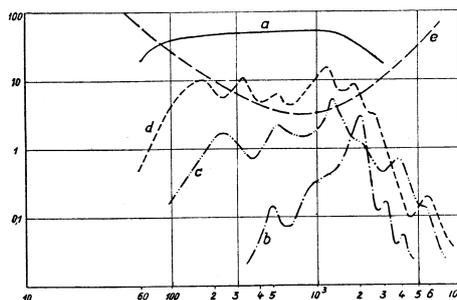


Bild 2.4: Typische Frequenzgänge von Lautsprechern: a) „ideal“, b) gewöhnlicher Trichter, c) Exponential-Trichter, d) dyna-mischer Lautsprecher in einer Schallwand, e) „ideal“ gemäß Ohrempfindlichkeit

^{†1}Bei stärkeren Endröhren, z.B. AL4 mit 36 mA Anodenstrom wird in der Wicklung der Spule gemäß $P = I^2 \cdot R$ die ca. 9 fache Wärmeleistung erzeugt. Dies führt i.a. zum Schmelzen der damaligen Schellack-Isolation, also zu Kurzschlüssen und ggf. zum Verkohlen der Spule.

^{†2}Beim Anschluß des Lautsprechers ist darauf zu achten, daß der Strom in der richtigen Richtung durch die Spule fließt. Fließt er verkehrt herum, wird der Dauermagnet des Antriebssystems geschwächt. Ist der Abstand zwischen Magnet und Membran gering, so „klebt“ die Membran am Magneten, wenn die Richtung des Stroms stimmt. An der Schraube stellt man dann so viel nach, daß die Membran gerade frei wird, was sich mit einem „klack“ bemerkbar macht.

3 Alternative Schallwandler

Auf der Suche nach weiteren Möglichkeiten, elektrische Schwingungen in akustische Signale umzuwandeln, wurden unterschiedliche physikalische Prinzipien ausprobiert. Manches davon mutet heute kurios an.

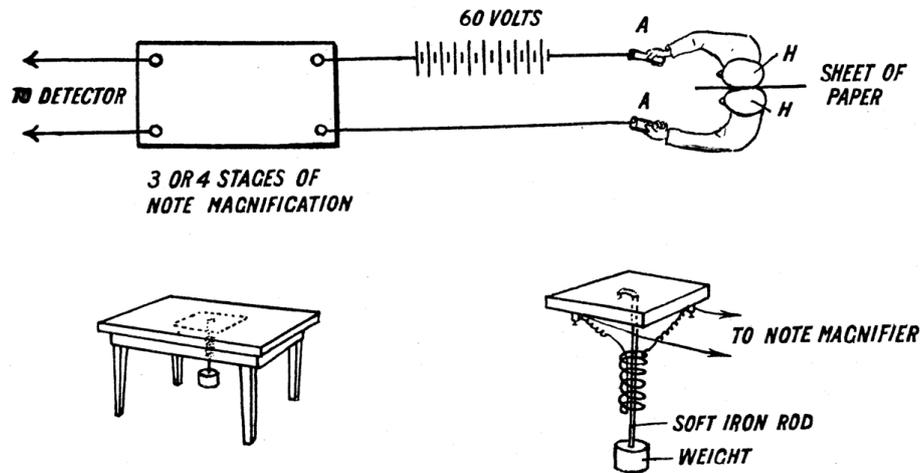


Bild 3.1: Kuriose Arten der Schallwandlung

Die erste in Bild 3.1 gezeigte Art ist in der Tat sehr alt, jedoch nicht ganz ungefährlich und wird nicht zur Nachahmung empfohlen.

Eine Tischplatte mit Hilfe einer Magnetspule zum Tönen anzuregen, zeigt dagegen bereits in eine Richtung, die sich schließlich bewährt hat.

Ein ganz anderes Prinzip benutzt der Johnsen-Rahbek'sche Lautsprecher. Hier wird die elektrostatische Anziehungskraft zwischen einem Zylinder aus Achat und einem Metallband ausgenutzt, Bild 3.2.

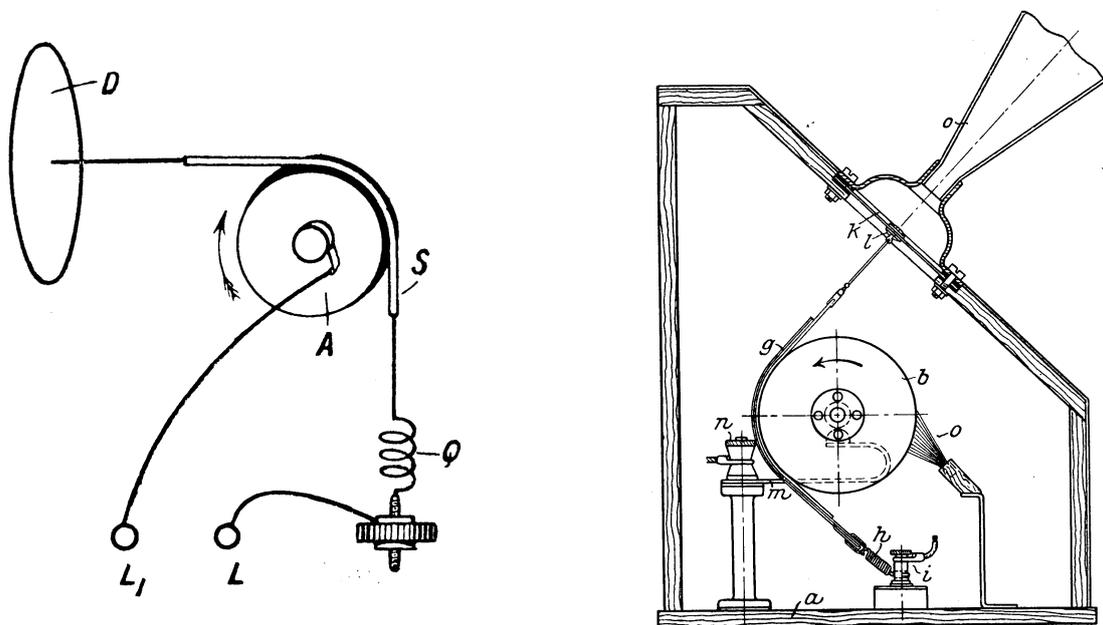


Bild 3.2: Prinzip und Konstruktion eines Johnsen-Rahbek Lautsprechers

Eine praktische Realisierung eines Johnsen-Rahbek'schen Lautsprechers ist in Bild 3.3 dargestellt. Hier wurde ein Musikinstrument als Resonanzkörper zur Schallabstrahlung verwendet. Man war damals der Meinung, daß sich Musikinstrumente

zur Wiedergabe von Musik auch hier besonders eignen.

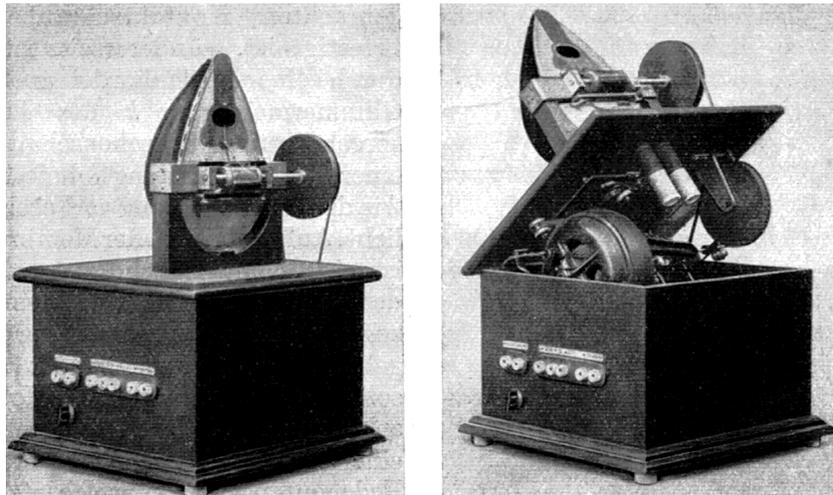


Bild 3.3: Realisierter Johnsen–Rahbek’scher Lautsprecher

Beim Johnsen–Rahbek’schen Lautsprecher stammt die Energie für den Schall aus der mechanischen Drehung der Walze. Daher ist damit eine größere Lautstärke erreichbar. Eine Modifikation dieses Prinzips zeigt das nächste Bild 3.4. Hier schleift eine Korkscheibe *f* auf einer Achatscheibe.

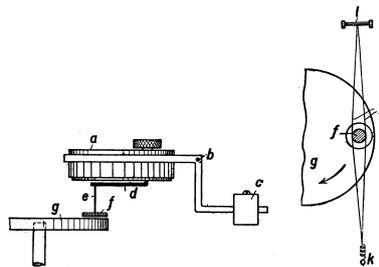


Bild 3.4: Motor–Lautsprecher

Es wurde aber auch versucht, mit Hilfe von stömender Luft einen Lautsprecher zu realisieren, Bild 3.5.

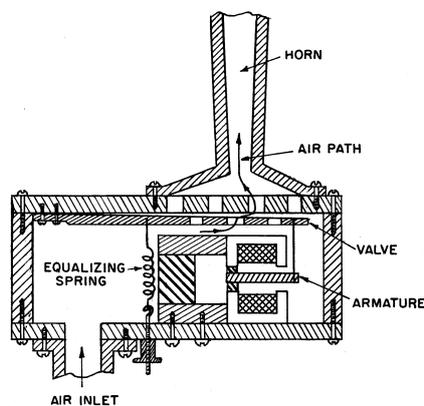


Bild 3.5: Luftdruck–Lautsprecher

Im Prinzip erinnert dieser Luftdruck–Lautsprecher an die Ansteuerung von Orgelpfeifen. Wie mag der geklungen haben?

4 Antriebssysteme für Lautsprecher

4.1 Magnetische Systeme

Hier werden die elektromagnetischen Antriebssysteme betrachtet. Diese wandeln die als elektrische Ströme vorhandenen Signale in entsprechende Bewegungen und damit in akustische Signale um. Das geschieht mit Hilfe der magnetischen Wirkungen, die durch Spulen in einem magnetischen Gleichfeld erzeugt werden.

Zwei typische Systeme von magnetischen Lautsprechern werden in Bild 4.1 dargestellt.

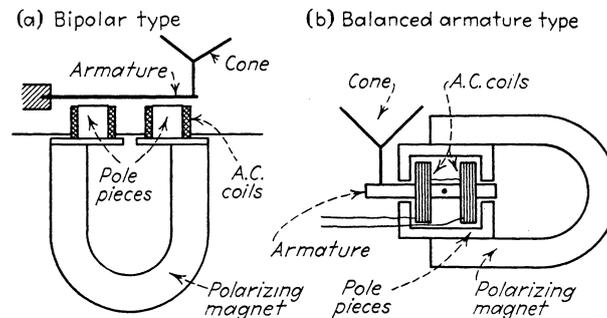


Bild 4.1: Antriebssysteme für magnetische Lautsprecher; links: einseitig eingespannte Stahlzunge; rechts: entlastetes Vierpol-System

Bei den Zungen-Systemen gibt es einseitig und beidseitig eingespannte Zungen, Bild 4.2. Auch hier ist wieder eine Einstellmöglichkeit für den optimalen Abstand der Zunge vom Magnetsystem vorhanden.

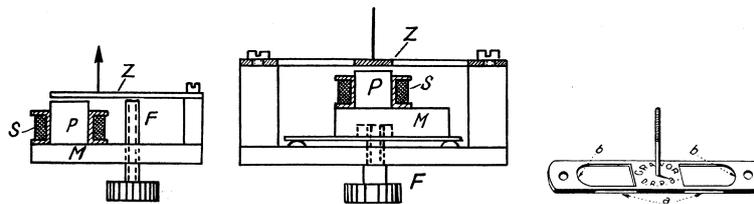


Bild 4.2: Zungen-Systeme für magnetische Lautsprecher; links: einseitig eingespannte Stahlzunge; mitte: beidseitig eingespannte Stahlzunge; rechts: Stahlzunge Detail, *a* ist Dämpfungsmaterial.

Das Vierpol-System ist in Bild 4.3 genauer dargestellt.

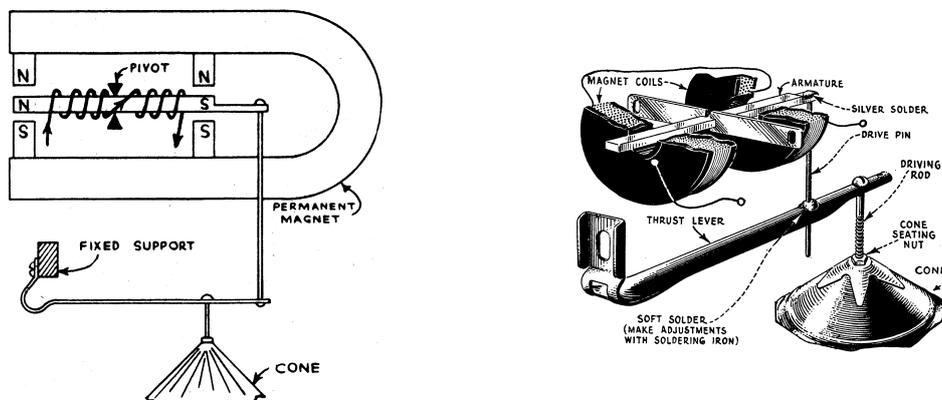


Bild 4.3: Vierpoliges System Prinzip und perspektivische Darstellung; der Anker ist kippbar gelagert.

4.2 Das AEG-System

Die AEG entwickelte für ihre Gealion Lautsprecher ein magnetisches Antriebssystem mit Tiefenkompensation. Diese erfolgt dadurch, daß der Drehpunkt der Zunge so verschoben wird, daß die magnetische Kraft auf die Zunge (näherungsweise) proportional zum Strom wird, wodurch die sonst bei magnetischen Systemen üblichen nichtlinearen Verzerrungen reduziert werden, Bild 4.4.

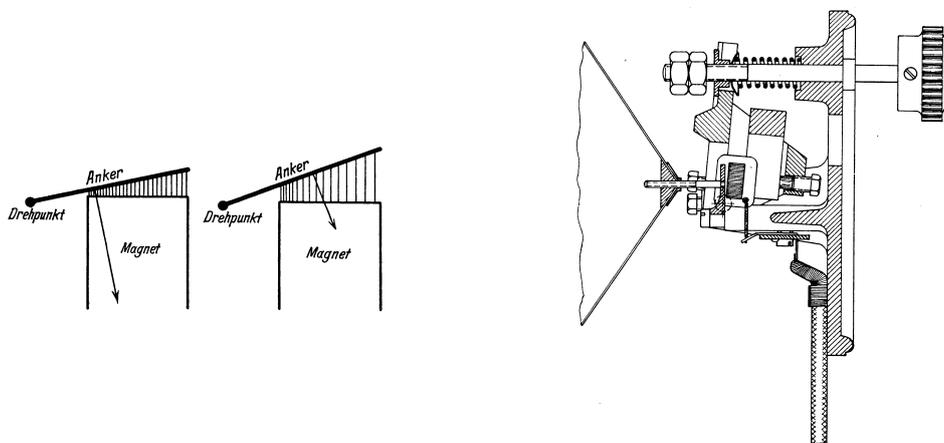


Bild 4.4: Prinzip und Schnitt des AEG Gealion Lautsprechers mit Tiefenkompensation

4.3 Das Induktor-Dynamische System

Auf den ersten Blick könnte man das induktor-dynamische System leicht mit dem oben beschriebenen Vierpolsystem verwechseln. Es besteht jedoch der wesentliche Unterschied darin, daß der Anker nicht drehbar gelagert ist, sondern sich horizontal hin und her bewegt, Bild 4.5.

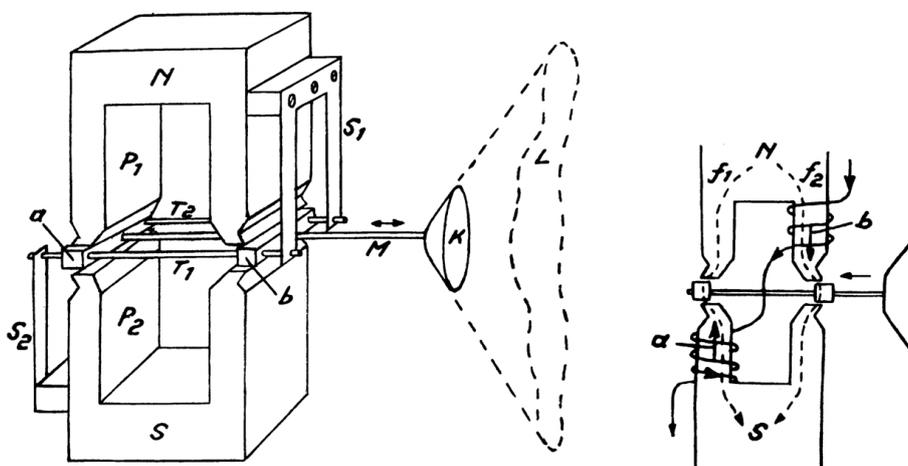


Bild 4.5: Das Induktor-Dynamische System

Durch die horizontale Bewegung des Ankers ist gewährleistet, daß dieser auch bei großen Auslenkungen nicht die Magnetpole brührt oder daran anschlägt — im Unterschied zum Vierpolsystem, bei dem das möglich ist.

4.4 Das Freischwinger-System

Beim Freischwinger-System ist gewährleistet, daß der Anker auch bei großen Amplituden nicht am Magneten anschlägt. Der Anker muß dafür vor dem Luftspalt des Magneten angeordnet sein, Bild 4.6.

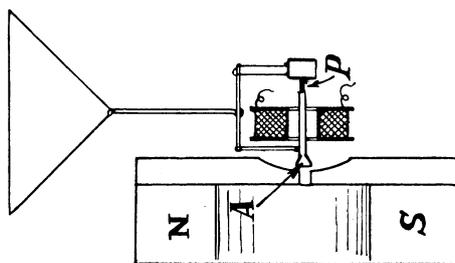


Bild 4.6: Prinzip eines Freischwinger-Systems

Im Prinzip kann man sich auch den Freischwinger aus dem Vierpolssystem durch entsprechende Vereinfachung entstanden denken, Bild 4.7.

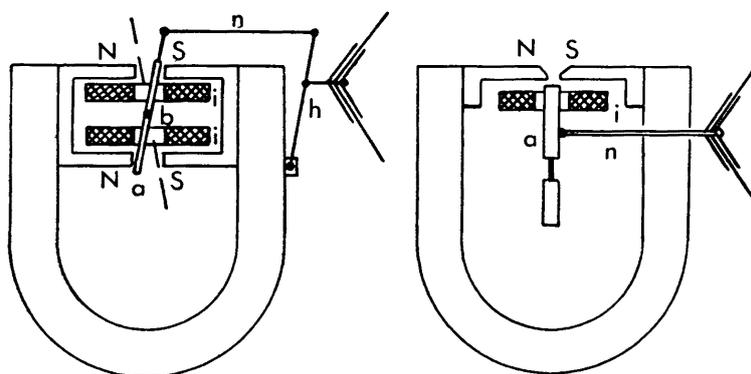


Bild 4.7: Freischwinger-System als vereinfachtes Vierpol-System

Der Anker schlägt zwar bei großen Amplituden nicht am Magneten an, aber die Auslenkung ist auf Grund der Konstruktion trotzdem nicht linear vom Strom abhängig. Folglich treten auch hier nichtlineare Verzerrungen auf. Freischwinger-Systeme sind billiger herzustellen als die übrigen magnetischen Systeme, weswegen sie recht verbreitet sind. Insbesondere in vielen Volksempfängern und im DKE sind sie zu finden. Bild 4.8 zeigt zwei Freischwinger-Systeme.

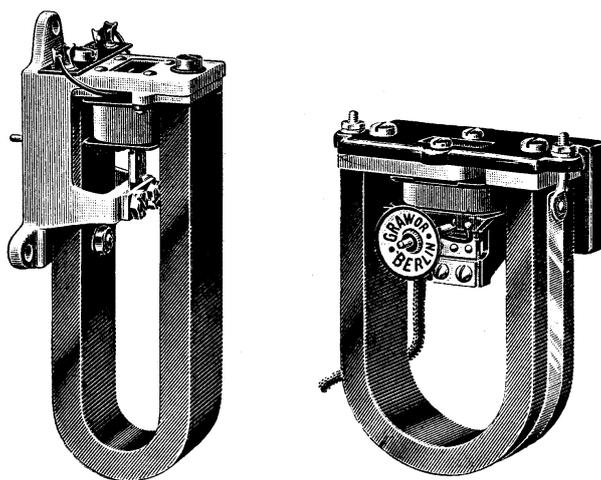


Bild 4.8: Freischwinger-System des VE301 (links) und „Kraft-Freischwinger“ (rechts)

4.5 Das Elektrodynamische Tauchspulen-System

Während bei den elektromagnetischen Systemen die Spule fest ist und der Anker sich bewegt, bewegt sich beim elektrodynamischen System die Spule. Um hohe Töne wiedergeben zu können, müssen die beweglichen Teile geringe Masse haben, also leicht sein. Für die Spule bedeutet das, daß sie nur aus wenigen Windungen relativ dünnen Drahtes bestehen kann.^{§1} Ein Schnittbild eines der frühesten elektrodynamischen Systeme (Magnavox) ist in Bild 4.9 dargestellt. Das magnetische Gleichfeld wird durch einen Elektromagneten erzeugt, dessen Spule mit *c* bezeichnet ist.

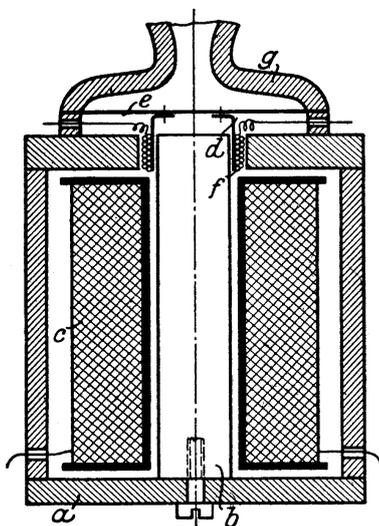


Bild 4.9: Schnittbild des Magnavox elektrodynamischen Systems

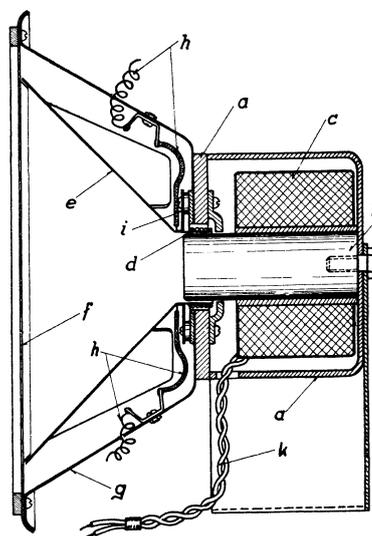
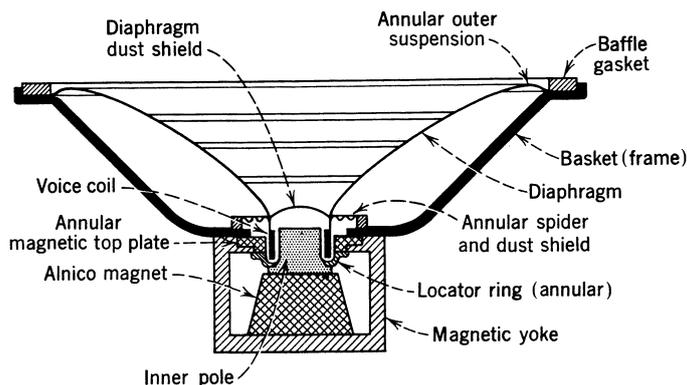


Bild 4.10: Schnittbild eines elektrodynamischen Lautsprechers

Bis auf die Membran *e*, die hier sehr klein ist und einen Trichter versorgt, hat dieses System alle Eigenschaften, die man auch bei späteren elektrodynamischen Lautsprechern, Bild 4.10, findet.

4.6 Permanent-Dynamische Lautsprecher

Nachdem entsprechend kräftige Magnete verfügbar waren, gab es meist Lautsprecher mit Permanentmagneten, Bild 4.11.



Note: Inexpensive speakers use magnetic yoke as magnetic top plate in single piece construction.

Bild 4.11: Schnitt durch einen modernen permanent-dynamischen Lautsprecher

^{§1} Da diese Schwingspulen niederohmig sind, werden zur Anpassung an den Ausgangswiderstand von Röhren entsprechende Übertrager benötigt.

4.7 Bandlautsprecher und Blatthaller

Bändchen-Lautsprecher und Blatthaller sind Lautsprechersysteme aus den '30er Jahren. Auch bei diesen Systemen bewegt sich kein Anker, sondern allgemeiner gesprochen der elektrische Leiter, hierbei nicht als Spule, sondern als „Band“ ausgebildet, Bild 4.12.

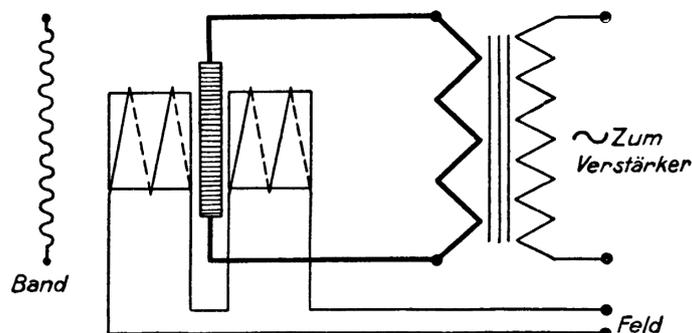


Bild 4.12: Prinzip des Bändchen-Lautsprechers

Das Bändchen besteht aus einer sehr dünnen Aluminium Folie, die geriffelt ist.

Der Blatthaller hat eine größere Fläche zur Schallabstrahlung (das „Blatt“), an deren Unterseite der elektrische Leiter mäanderförmig angebracht ist und damit in einen entsprechenden Magnetspalt eintaucht, Bild 4.13.

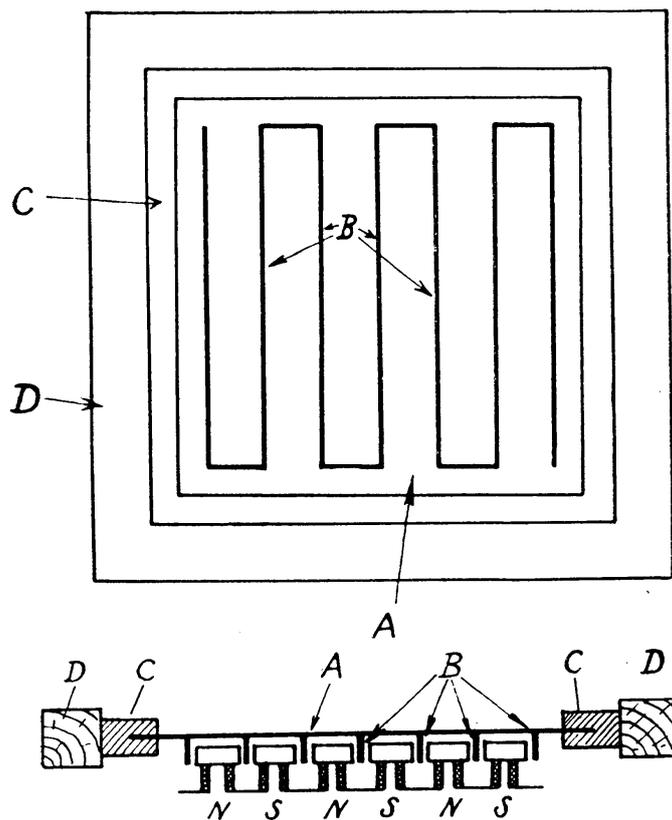


Bild 4.13: Prinzip des Blatthallers

Beide Formen konnten sich gegen den dynamischen Lautsprecher nicht durchsetzen.

5 Membran-Lautsprecher

Im Grunde hat jeder Lautsprecher eine Membran. Aber im Unterschied zum Horn-Lautsprecher bzw. Trichter-Lautsprecher ist beim Membran-Lautsprecher die Membran so groß, daß sie den Schall unmittelbar abstrahlen kann. Diese Art von Lautsprechern, z.B. Bild 4.11, ist heute am weitesten verbreitet.

5.1 Die Elektrodynamischen Lautsprecher

In Vorkriegsradios (und z.T. auch noch kurz nach dem Krieg) waren elektrodynamische Lautsprecher allgemein Stand der Technik, Bild 5.1. Das magnetische Gleichfeld wurde durch den Strom in einer Feld-Spule erzeugt.

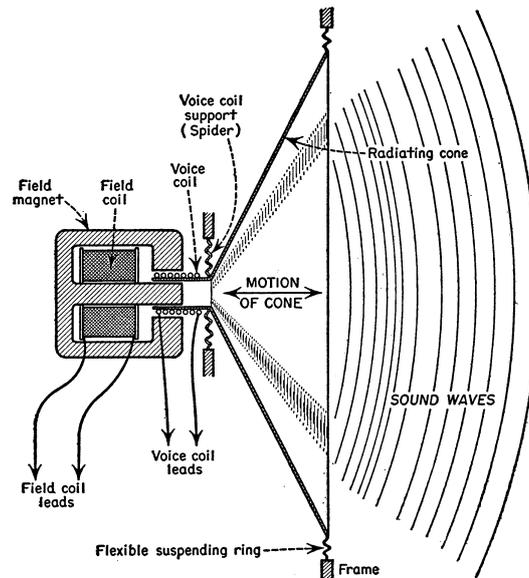


Bild 5.1: Schnitt durch einen elektro-dynamischen Lautsprecher

Die Explosions-Darstellung, Bild 5.2, läßt die Bestandteile des elektro-dynamischen Lautsprechers gut erkennen.^{¶1}

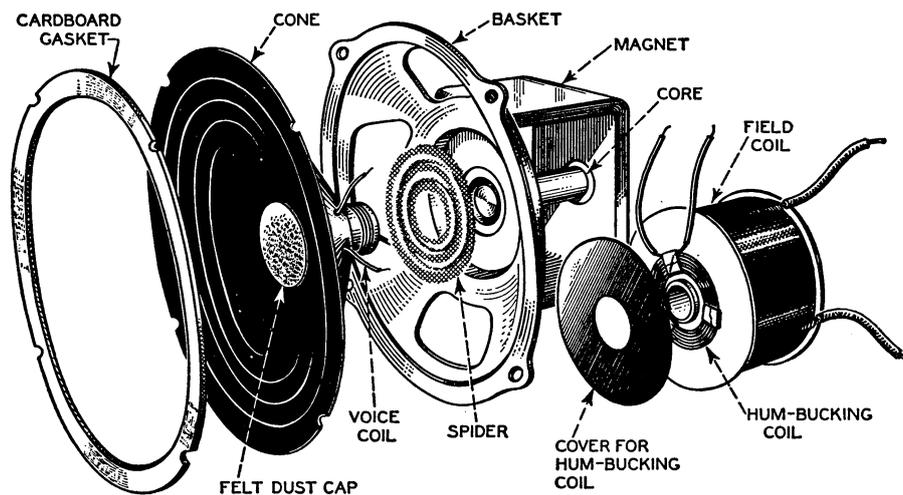


Bild 5.2: Explosionsdarstellung eines elektro-dynamischen Lautsprechers

^{¶1}Gegenüber dem Schnittbild 5.1 gibt es hier zusätzlich eine weitere Spule: „Hum-Bucking Coil“. Diese dient zur Reduzierung des Brumms, der u.a. durch die Restwelligkeit des Stromes in der Feld-Wicklung entsteht.

5.1.1 Die Stromversorgung des elektrodynamischen Lautsprechers

Für die Felderregung des elektrodynamischen Lautsprechers gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten, Bild 5.3:

A: Serienspeisung (durch den Anodenstrom des Radios)

B: Parallelspeisung

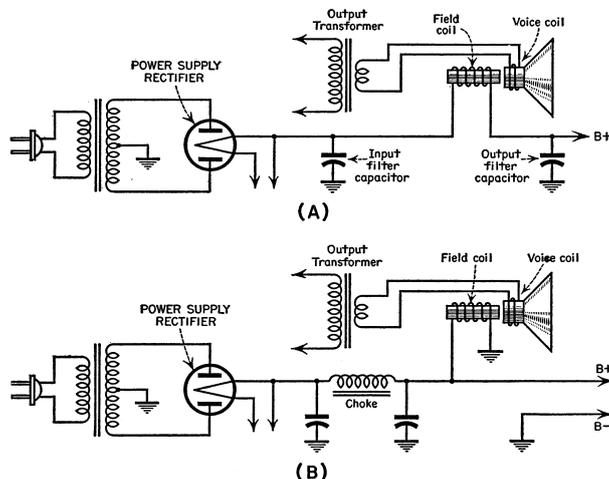


Bild 5.3: Zur Felderregung eines elektro-dynamischen Lautsprechers; (A) Serienspeisung, (B) Parallelspeisung

Die Parallel-Speisung (B) war zu Beginn der '30er Jahre verbreitet, als es Radiogeräte gab, die wahlweise ohne und mit eingebautem Lautsprecher angeboten wurden. In dieser Übergangszeit waren auch noch separate Lautsprecher verfügbar, die ein angebautes Netzteil hatten. In diesem Beispiel ist die Feldwicklung niederohmig. Die Gleichrichtung des Erregerstromes erfolgte dabei mit einem Selen-Brückengleichrichter, Bild 5.4.¹²

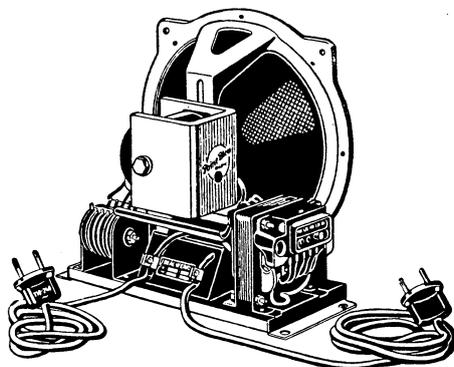


Bild 5.4: Elektro-dynamischer Lautsprecher mit Netzteil zur Felderregung.

Die Anodenspannung für den Radioapparat wurde mit Hilfe einer Gleichrichter-Röhre aus der Sekundärseite des Netztrafos in einer Gegentaktschaltung gewonnen. Deren Welligkeit wurde durch Filter-Kondensatoren (meist einige μF) und die Drosselwirkung der Erregerpule des Lautsprechers (A) bzw. einer extra Drossel (B) reduziert. Ganz zu beseitigen ist die Restwelligkeit, die sich als „Netzbrumm“ („Netzton“) im Lautsprecher äußert, allerdings nicht.

5.1.2 „Hum Bucking“ und „Shading Ring“

Um den Netzbrumm aufgrund des welligen Erregerstroms zu minimieren gibt es zwei Möglichkeiten:

¹²Weit häufiger hatten die Lautsprecher eine hochohmige Feldspule. Als Gleichrichter wurden dann Röhren verwendet, z.B. RGN1503 oder RGN1064.

1. Kompensation der Brummstörung durch Gegenschaltung einer entsprechenden Größe: „Hum Bucking“.
2. Anbringen eines Kurzschluß-Rings über der Erregerspule: „Shading Ring“.

Die Kompensations-Methode ist in Bild 5.5 gezeigt und die Anordnung mit dem Kurzschluß-Ring ist in Bild 5.6 dargestellt.

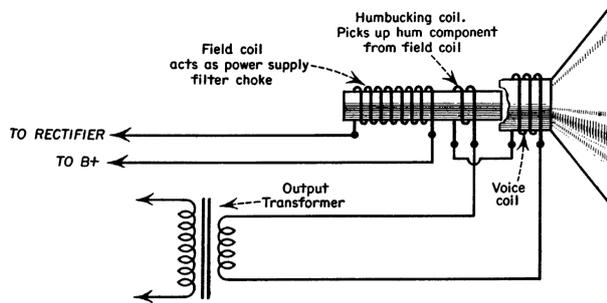


Bild 5.5: Elektro-dynamischer Lautsprecher mit Hum-Bucking.

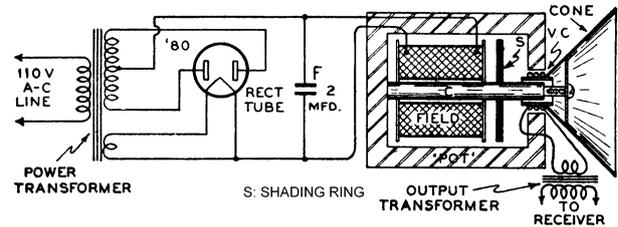


Bild 5.6: Elektro-dynamischer Lautsprecher mit Kurzschluß-Ring.

Beide hier dargestellten Methoden beseitigen nur das durch die Welligkeit des in der Erregerspule fließenden Stromes hervorgerufene Brummgeräusch. Nicht beseitigen läßt sich damit das Brummen, das durch die Restwelligkeit der Anodenspannung und deren Auswirkung auf die Verstärkerstufen entsteht.

Eine Kompensationsmethode für das Netzbrummen insgesamt besteht darin, daß der Ausgangsübertrager eine Anzapfung erhält, in die der Anodenstrom eingespeist wird. Hierdurch entsteht eine Brücken-Schaltung mit deren Hilfe sich der Brumm minimieren läßt.[6] Diese Methode wird auch bei Empfängern mit permanentdynamischem Lautsprecher angewandt.

Bei Radios mit elektrodynamischem Lautsprecher ist bei einer Reparatur ferner darauf zu achten, daß die Anschlüsse vom Ausgangsübertrager und zur Feldwicklung wieder in der gleichen Art wie ursprünglich angeschlossen werden. Wird der Anschluß z.B der Feldwicklung oder des Ausgangsübertragers anders herum angeschlossen, so kann dadurch eine ursprüngliche Brummkompensation verloren gehen und das Brummen im Lautsprecher läßt sich auch nicht durch Vergrößerung des Sieb-Elkos beseitigen.

5.2 Die Permanentdynamischen Lautsprecher

Mit der Verfügbarkeit von kräftigen Magneten ging man allgemein zu permanent-dynamischen Lautsprechern über, Bild 5.7.

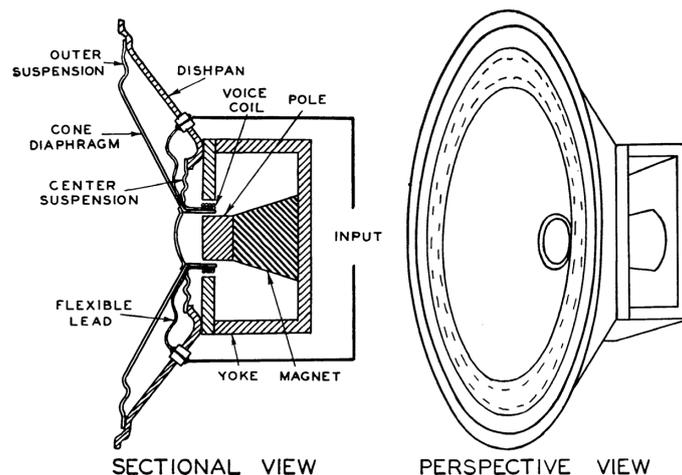


Bild 5.7: Permanent-dynamischer Lautsprecher im Schnitt und perspektivische Ansicht.

Die Explosions-Darstellung, Bild 5.8, zeigt, um wie viel einfacher ein permanent-dynamischer Lautsprecher gegenüber einem elektro-dynamischen Lautsprecher, Bild 5.2, ist.

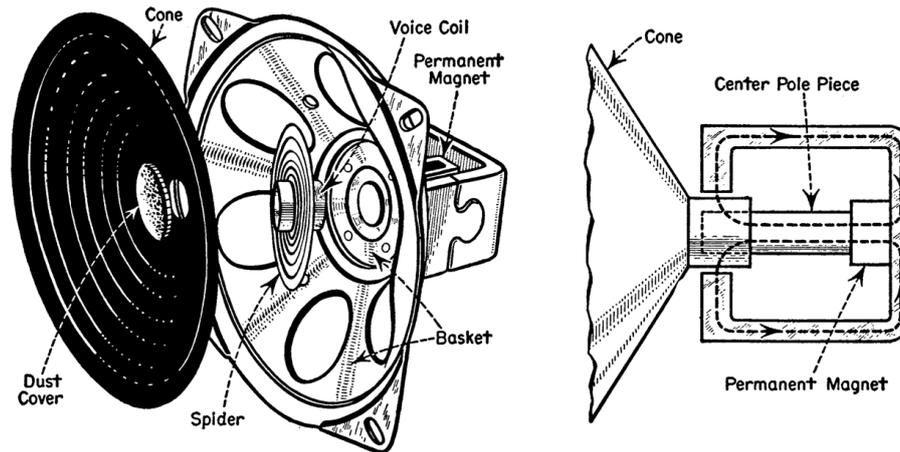


Bild 5.8: Explosionsdarstellung eines permanent-dynamischen Lautsprechers

5.3 Befestigung der Membran

Der Luftspalt worin die Schwingspule sich bewegt, muß möglichst klein sein, damit eine große magnetische Feldstärke im Spalt herrscht. Es ist daher notwendig, daß die Membran an dieser Stelle genau zentriert ist und exakt geführt wird. Hierzu dient die zentrale „Spinne“, Bild 5.9.

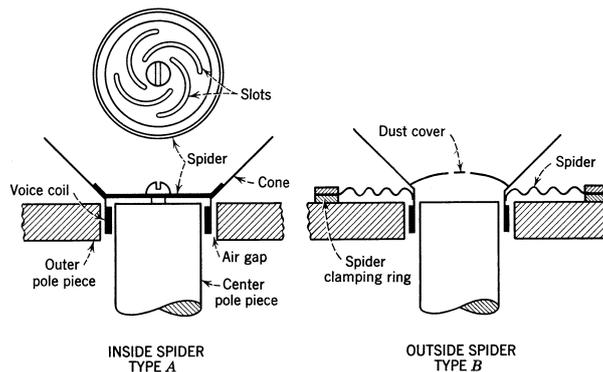


Bild 5.9: Innere Zentrierspinne eines dynamischen Lautsprechers; A Befestigung innen; B Befestigung außen

Die Methode A der Innenzentrierung ist die älteste. Sie hat den Nachteil, daß der Luftspalt nicht vor Staub und ggf. Feilicht aus Eisen geschützt ist. Dagegen ist die Außenzentrierung (bei modernen Lautsprechern) gleichzeitig als Staubschutz ausgeführt, vergleiche Bild 5.2. Dagegen zeigt Bild 5.10 ältere Formen von Spinnen, die i.a. aus dünnem Pertinax gefertigt wurden. Auch hier gibt es Außenzentrierung, jedoch damals noch ohne Staubschutz.

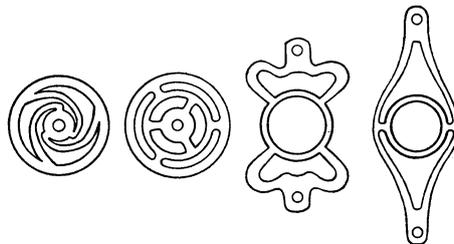


Bild 5.10: Ältere Formen von Zentrierspinnen für dynamische Lautsprecher; links zwei für Befestigung innen; rechts zwei für Befestigung außen

Die Zentrierspinnen müssen (unabhängig von der Bauform) so beschaffen sein, daß sie möglichst geringe Kräfte auf die Membran in Richtung ihrer Auslenkung ausüben. Diese Forderung gilt auch für die äußere Befestigung der Membran am Korb des Lautsprechers, Bild 5.11.

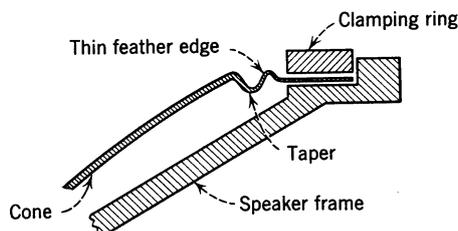


Bild 5.11: Äußere Befestigung der Membran; Die Sicke ist weich ausgeführt, damit die Rückstellkraft gering ist.

Ein „idealer“ Lautsprecher hätte eine masselose, jedoch völlig steife Membran, die im Zentrum und außen unendlich weich gehalten würde. Ein solcher „idealer“ Lautsprecher könnte von den tiefsten bis zu den höchsten Frequenzen alles gleichmäßig wiedergeben. Er wäre also ein ideal gedämpftes System, das keinerlei (periodische) Eigenschwingungen ausführt. Praktische Lautsprecher haben jedoch eine Membran (einschließlich Schwingspule) mit Masse und es gibt durch die Spinne und die Sicke am Rand (auslenkungsabhängige) Rückstellkräfte. Physikalisch handelt es sich um ein (gedämpftes) Feder-Masse-System, das schwingungsfähig ist.^{†3}

5.4 Knick- und Partialschwingungen der Membran

Reale Membranen haben eine verteilte Masse. Daher können sie sowohl Knickschwingungen als auch Partialschwingungen ausführen. Beide Formen sind unerwünscht, weil sie sowohl zu frequenzabhängige Resonanzüberhöhungen als auch zu Richtungsabhängigkeiten beim abgestrahten Schall führen.

Das Problem der Knickschwingungen wurde schon frühzeitig erkannt. Bereits Ende der '30er Jahre wurde deshalb die NAWI (nicht abwickelbare) Membran zumindest bei den Tieftonsystemen eingeführt, Bild 5.12.



Bild 5.12: Die NAWI-Membran (oben) im Unterschied zur Konus-Membran, welche leicht Knick-Schwingungen ausführen kann (unten).

Für höhere Ton-Frequenzen können die Membranen recht komplizierte Partialschwingungen ausführen, Bild 5.13.

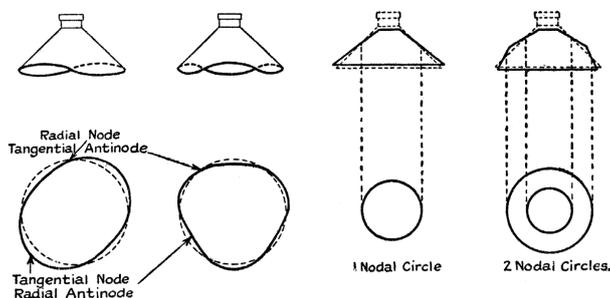


Bild 5.13: Beispiele für Partialschwingungen, die Membranen bei höheren Frequenzen ausführen können.

^{†3}Der Konstrukteur des Lautsprechers sorgt dafür, daß diese Resonanzüberhöhung, die man messen kann, wenn der Lautsprecher an einem Tongenerator mit veränderlicher Frequenz betrieben wird, bei möglichst tiefen Frequenzen entsteht.

Die Partialschwingungen sind u.a. der Grund dafür, daß Lautsprecher sinnvoll nur bis zu einer modellspezifischen oberen Grenzfrequenz betrieben werden können.^{¶4}

Je mehr Partialschwingungen ein Lautsprecher erzeugt, um so „zerklüfteter“ ist seine Lautstärke-Kurve in Abhängigkeit von der Frequenz, Bild 5.14 und Bild 2.4 (Seite 3).

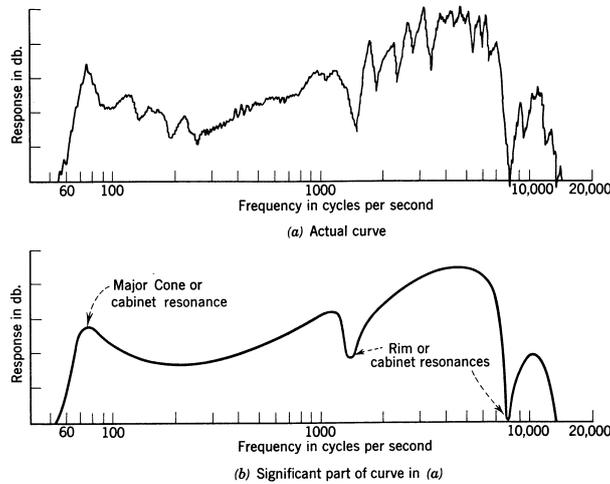


Bild 5.14: Beispiel des Frequenzgangs eines (eingebauten) Lautsprechers

5.4.1 Richtungsabhängigkeit

Je höher die Frequenz ist, um so mehr schwingt nur noch der innere Teil der Membran phasenrichtig, während weiter außen liegende Teile der Membran andersphasig schwingen (Partialschwingungen). Mißt man die Lautstärke in einem Halbkreis um den Lautsprecher, so erkennt man eine deutliche Richtungsabhängigkeit, Bild 5.15. Das bedeutet auch, daß sein Frequenzgang richtungsabhängig ist, Bild 5.16.

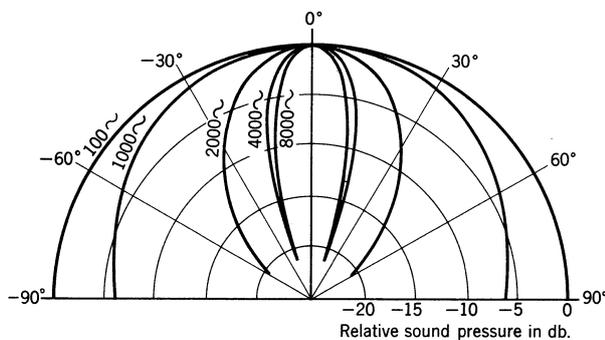


Bild 5.15: Beispiel der Richtwirkung eines Lautsprechers in Abhängigkeit der Frequenz

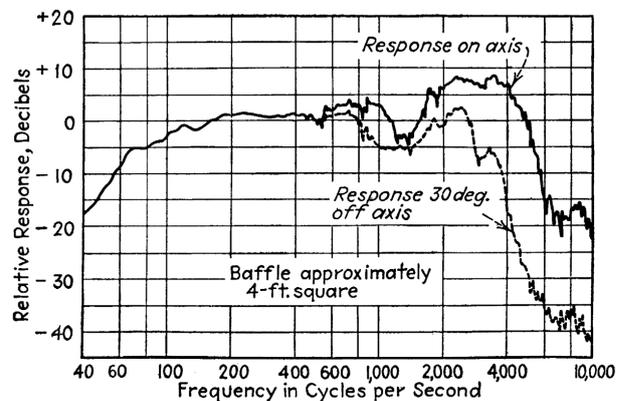


Bild 5.16: Winkelabhängigkeit des Frequenzgangs eines in eine Schallwand eingebauten Lautsprechers

5.5 Breitband-Lautsprecher

Durch die Formgebung der Membran können die Wiedergabeeigenschaften eines Lautsprechers verbessert werden. Bild 5.17 zeigt typische Formen der Membranen.

^{¶4}Lautsprecherboxen haben daher mehrere Systeme eingebaut: Tieftöner, Hochtöner und ggf. Mitteltöner.

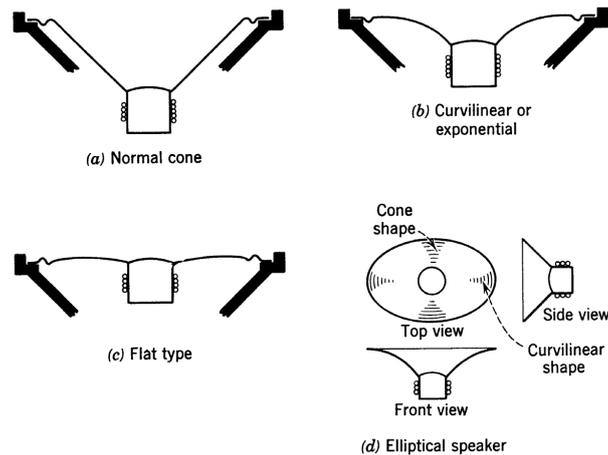


Bild 5.17: Typische Formen von Membranen

Die Kurvenformen (b) und (c) sind besonders günstig bezüglich des Frequenzgangs.¹⁵ Allerdings ist die maximal abgebbare Leistung bei der Membranform (a) größer.

Alternativ gibt es auch Lautsprecher mit unterteilter Membran, Bild 5.18.

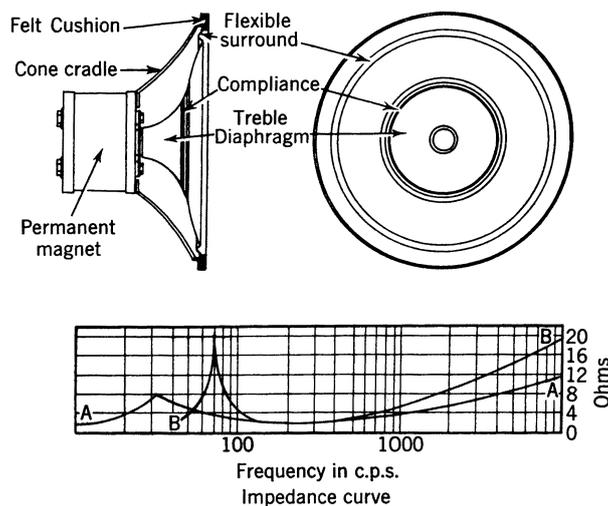


Bild 5.18: Breitband-Lautsprecher mit unterteilter Membran; Impedanz der Schwingspule (A) im Vergleich zu einem konventionellen Lautsprecher (B)

In Bild 5.18 ist die Impedanz der Schwingspule in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt. Der Resonanz bei tiefen Frequenzen entspricht eine Zunahme der Impedanz der Schwingspule. Typisch ist auch der Anstieg für höhere Frequenzen. Da es eine Rückwirkung zwischen der Impedanz der Schwingspule und dem Frequenzgang des Lautsprechers gibt, ist ein Lautsprecher dann (prinzipiell) besser, wenn die Impedanz zu höheren Frequenzen weniger stark ansteigt.

5.6 Lautsprecher-Kombinationen

Eine weitere Möglichkeit zur Erweiterung des Frequenzbereichs (nach höheren Frequenzen) ist die Kombination eines Tief- tonsystems mit einem Hochtonsystem. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten.

- Montage eines Hochtöners vor den Tieftöner, Bild 5.19
- Tiefton-Membran mit Hochton-Kegel, Bild 5.20

¹⁵Ein 35 cm Lautsprecher mit Membranform (b) kann effektiv von 40 Hz bis 10 kHz arbeiten. Die Form (c) hat eine noch höhere Grenzfrequenz.

- Tiefton-Membran mit Hochton-Kalotte, Bild 5.21
- Koaxial-System, Bild 5.23

Koaxiale Systeme haben den Vorteil, daß der Schall aus exakt der gleichen Stelle kommt, unabhängig davon, ob es sich um tiefe oder um hohe Töne handelt. Koaxiale Systeme sind nicht sehr verbreitet, was mit ihren Kosten zusammen hängen dürfte. Häufiger findet man in Lautsprecher-Boxen für Tief-, Mittel- und Hochtöner getrennte Systeme eingebaut.

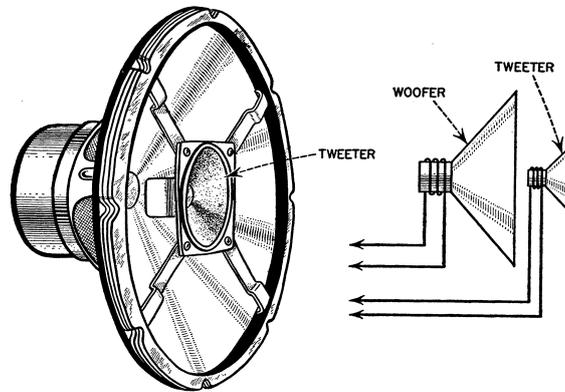


Bild 5.19: Kombination aus Tiefton-Lautsprecher mit vorgesetztem Hochton-Lautsprecher. Der Anschluß erfolgt über eine elektrische Weiche.

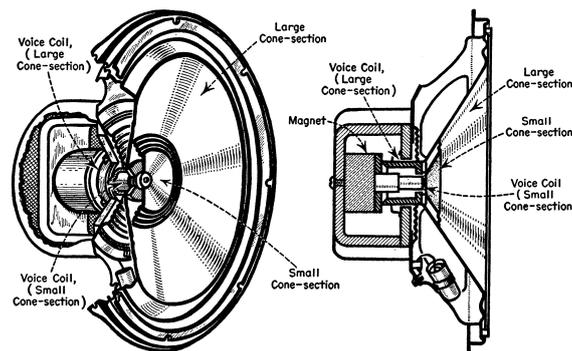


Bild 5.20: Tiefton-Lautsprecher mit vorgesetztem Hochton-Kegel. Der Anschluß erfolgt über eine elektrische Weiche.

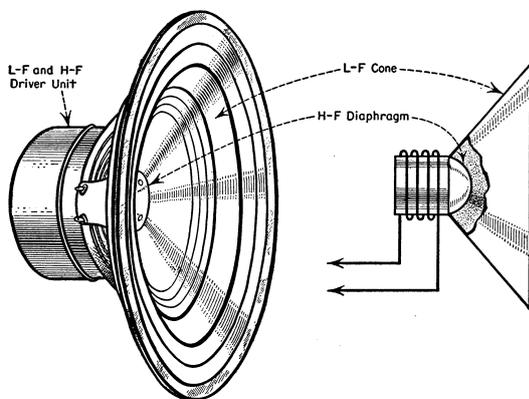


Bild 5.21: Tiefton-Lautsprecher mit Hochton-Kalotte

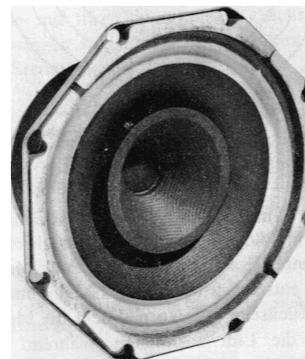


Bild 5.22: Tiefton-Lautsprecher mit Hochton-Kegel

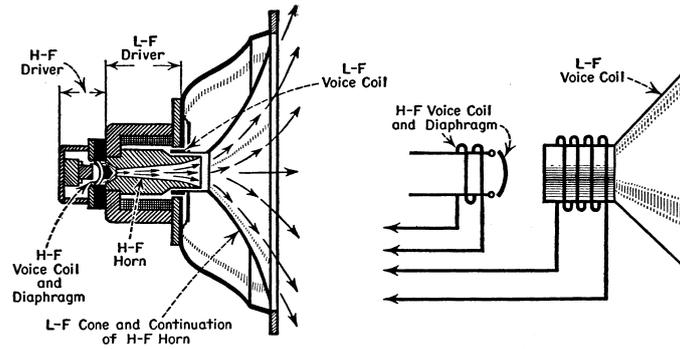


Bild 5.23: Koaxial-Lautsprecher. Der Anschluß erfolgt über eine elektrische Weiche.

Bis auf die Lautsprecher mit Hochtonkalotte Bild 5.21 bzw. Hochtonkegel Bild 5.22, die nur eine Schwingspule haben, benötigen die anderen Konzepte eine vorgeschaltete Lautsprecher-Weiche, Bild 5.24.

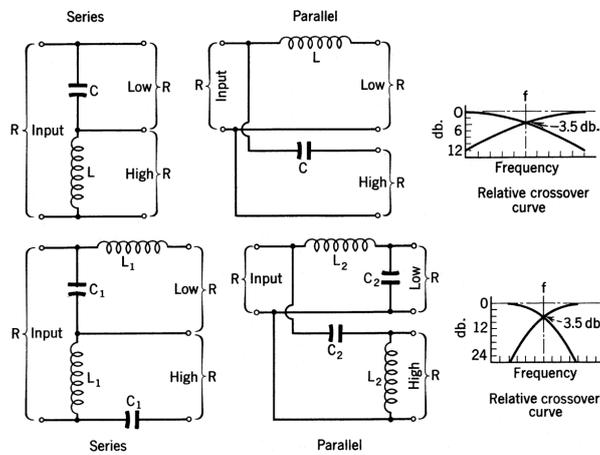


Bild 5.24: Ein- und zweigliedrige Lautsprecherweichen; Serienanordnung und Parallelanordnung.

5.7 Sonderformen von Membranen

Neben der allgemein üblichen kreisförmigen Membran findet man häufig auch die ovale Membran, die oft auch aus Platzgründen gewählt wird, Bild 5.25.

In den '30er Jahren gab es den „Falz-Lautsprecher“, Bild 5.26, der ein magnetisches System hatte.

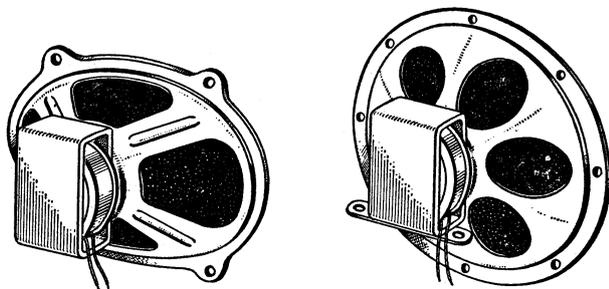


Bild 5.25: Ovaler und runder Lautsprecher

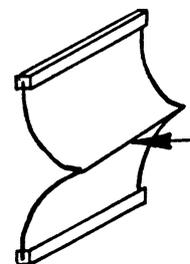


Bild 5.26: Membran eines Falz-Lautsprechers

6 Horn-Lautsprecher

Der Horn-Lautsprecher ist aus dem Trichter-Lautsprecher hervorgegangen. Um den Trichter-Lautsprecher effektiver zu machen, mußte der Trichter länger gemacht werden. Da nun aber die Bauform zu groß wurde, wurde der Trichter gebogen, ähnlich dem Horn als Musikinstrument, Bild 6.1. Moderne Formen zeigt Bild 6.2.

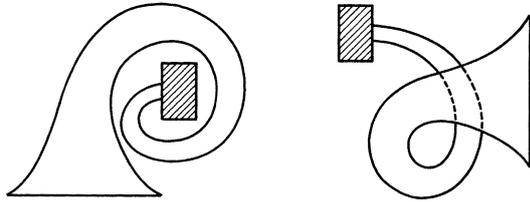


Bild 6.1: Der Übergang vom Trichter zum Horn-Lautsprecher

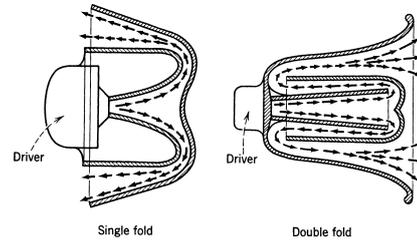


Bild 6.2: Moderne Formen des gefalteten Horn-Lautsprechers

Im Prinzip besteht ein (moderner) Horn-Lautsprecher aus einem kleinen dynamischen Tauchspulen-System, einer Schallkammer (Druckkammer), und einem Trichter oder Horn, das über eine kleine Öffnung an diese Schallkammer angeschlossen ist, Bild 6.3.

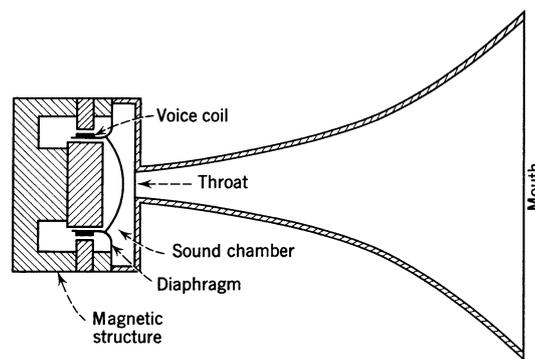


Bild 6.3: Prinzipielle Bestandteile eines Horn-Lautsprechers

Der Trichter dient dazu, den Schallwandler an die akustische Impedanz der Luft anzupassen. Dies betrifft insbesondere den Übergang von der Schallkammer (Druckkammer) zum Horn, Bild 6.4.

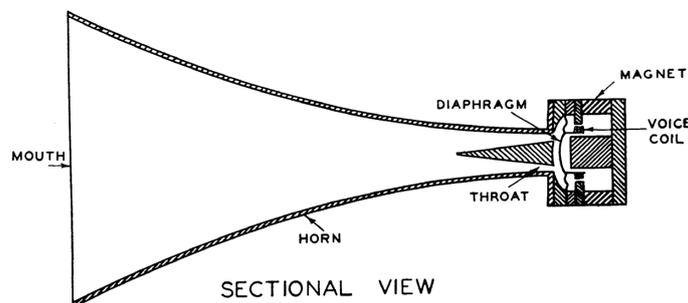


Bild 6.4: Schnitt eines Horn-Lautsprechers

Der Schallwandler erzeugt in der Kammer Schallwellen mit großem Wechsel-Druck. Das Horn dient als Anpaßnetzwerk zur Anpassung an das freie Schallfeld. Je länger das Horn ist und je größer die Austrittsöffnung wird, um so kleiner ist die mit einem Horn erreichbare untere Grenzfrequenz, Bild 6.5.

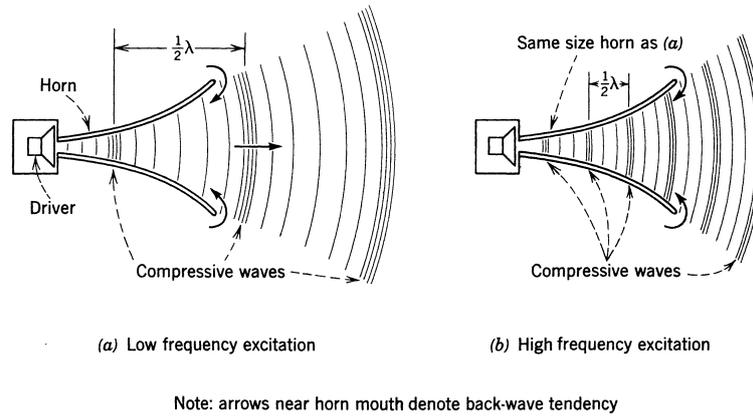


Bild 6.5: Zur unteren Grenzfrequenz eines Horn-Lautsprechers; Bei zu niedriger Frequenz, d.h. zu großer Wellenlänge geht durch die rücklaufende Welle (gebogene Pfeile) die Anpassung verloren und dadurch nimmt die Lautstärke ab.

Die untere Grenzfrequenz hängt bei gleicher Länge und gleicher Öffnung des Horns von seiner Form ab, Bild 6.6. Optimal ist die hyperbolische Form. Die ursprüngliche konische Trichter-Form ist dagegen ungünstig.

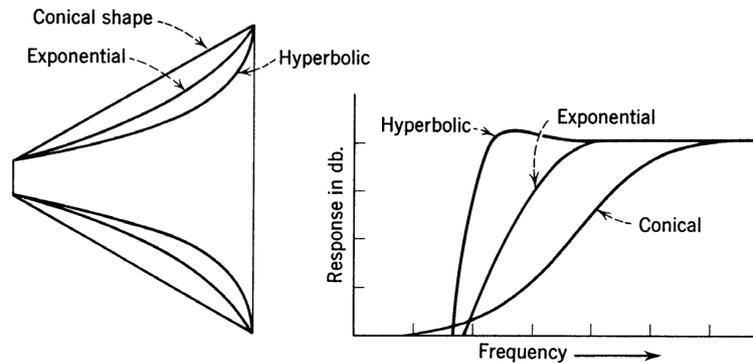


Bild 6.6: Die untere Grenzfrequenz eines Horn-Lautsprechers hängt von seiner Form ab.

6.1 Die Erregersysteme für Horn-Lautsprecher

Prinzipiell gibt es hierbei zwei Typen. Der „annulare“ Typ hat eine ringförmige Membran, die aufgrund ihrer schmalen Form kaum zu Partialschwingungen neigt. Der „dome“ Typ ist, im Unterschied zu einer Kalotte, nach innen gewölbt, Bilder 6.7 und 6.8. Erkennbar sind auch die Maßnahmen zur Transformation des akustischen Widerstandes zwischen Membran und Horn.

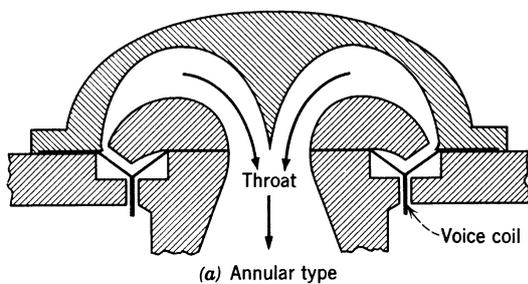


Bild 6.7: Erregersystem mit Ringmembran

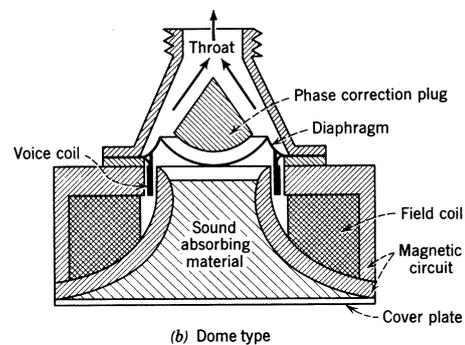


Bild 6.8: Erregersystem mit (inverser) Kalottenmembran

Trichter-Lautsprecher der '20er Jahre hatten i.a. vierpolige magnetische Erregersysteme, Bild 6.9. Die akustische Anpassung und die dafür erforderliche Transformation waren noch unvollständig.

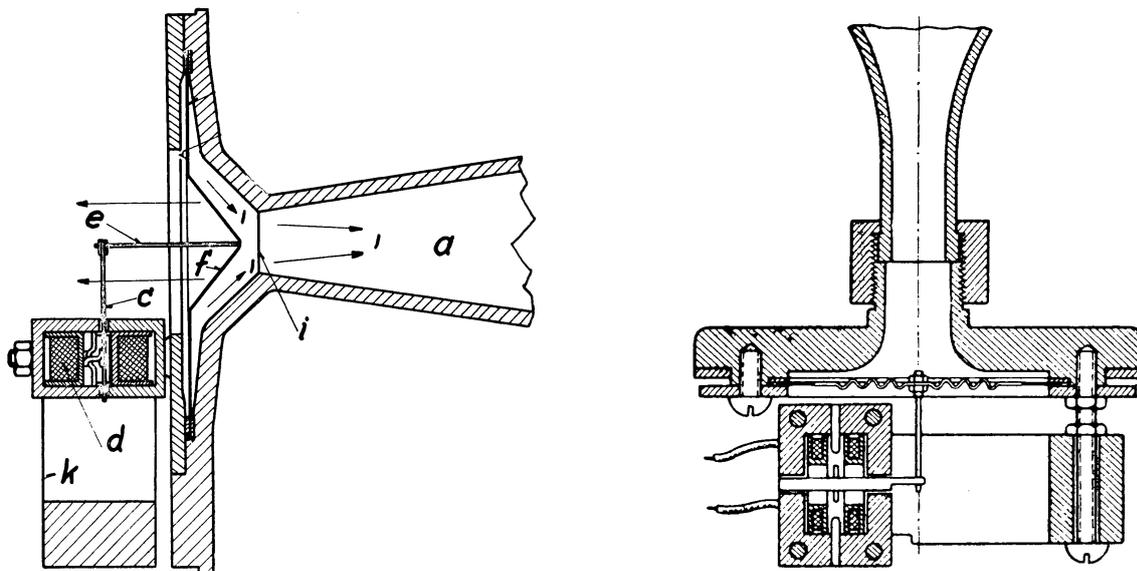


Bild 6.9: Vierpolige magnetische Erregersysteme von Trichter-Lautsprechern

Die Anwendung der Hornlautsprecher erstreckt sich heute auf Hochtöner einerseits und „Bahnhofs-lautsprecher“ andererseits. In den '20er Jahren war jedoch die Horn- bzw. Trichter-Form die einzige, die größere Lautstärken realisieren konnte, Bild 6.10.

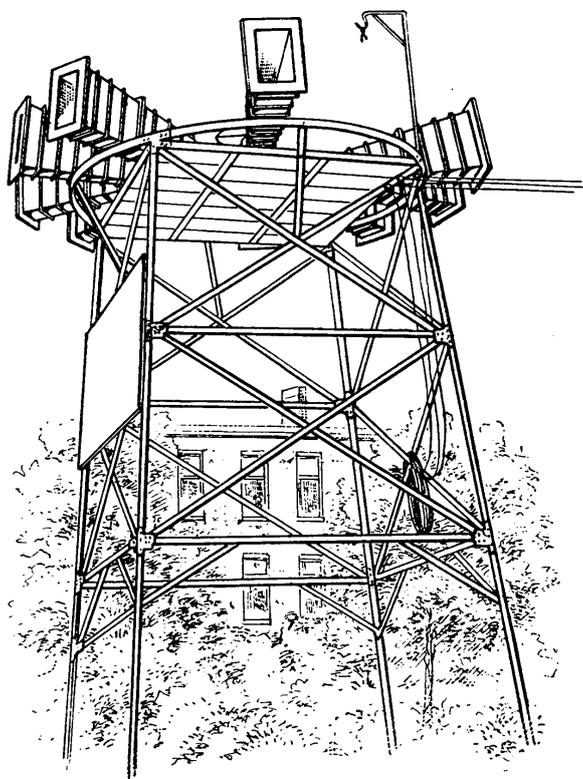


Bild 6.10: Trichter-Megaphon in den '20er Jahren.

7 Sonderformen

7.1 Elektrostatische Lautsprecher

Elektrostatische Lautsprecher sind im Prinzip Kondensatoren, bei denen eine Elektrode beweglich ist und die so ein elektrisches Wechselfeld, das einem Gleichfeld überlagert ist, in Schallschwingungen umwandeln kann, Bild 7.1.**1

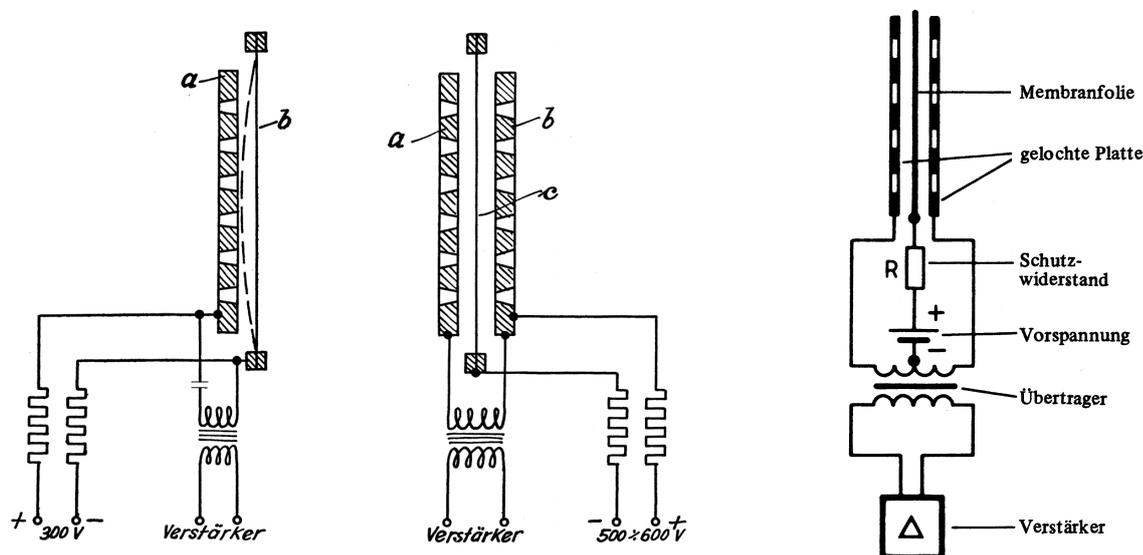


Bild 7.1: Prinzip des elektrostativen Lautsprechers

Aus Bild 7.1 ist erkennbar, daß nur die symmetrische Anordnung als Lautsprecher praktische Relevanz hat, weil hier die Membran im Ruhezustand frei von einer mechanischen Vorspannung ist.

7.2 Kristall-Lautsprecher

Kristall-Lautsprecher nutzen das Piezo-Prinzip, Bild 7.2. Sie werden meist als Hochtöner eingesetzt.

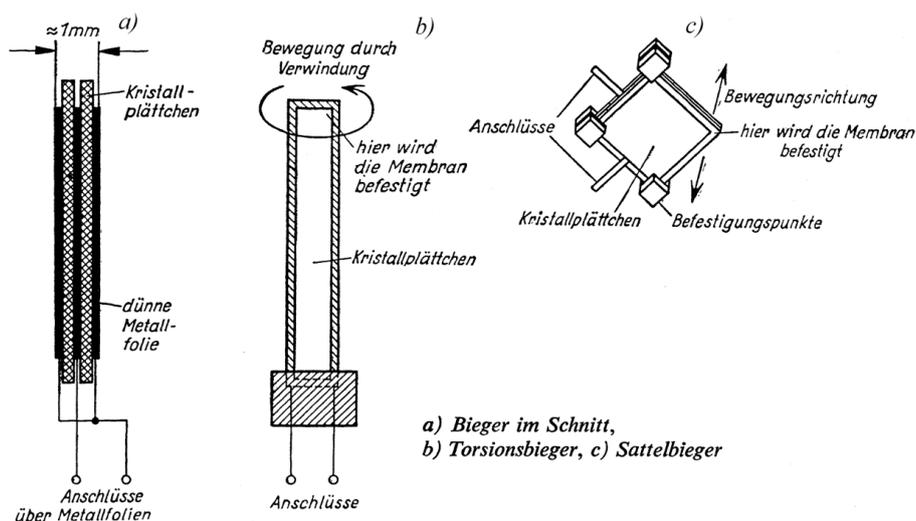


Bild 7.2: Antriebsysteme von Kristall-Lautsprechern

Der Anschluß der Membran an den Sattelbieger wird in Bild 7.3 gezeigt.

**1 Der elektrostativische Wandler hat die größere Anwendung im „Kondensator-Mikrofon“, das prinzipiell ganz ähnlich aufgebaut ist.

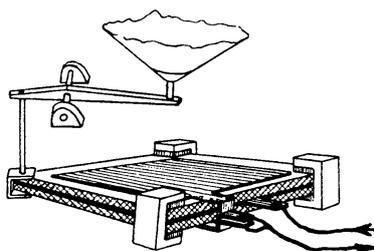


Bild 7.3: Antrieb der Membran beim Sattelbieger

7.3 Ionen-Lautsprecher

Der Ionen-Lautsprecher nutzt eine hochfrequente Korona-Entladung, Bild 7.4. Durch die Amplituden-Modulation der Hochfrequenz-Schwingung mit dem Audio-Signal schwankt die Stärke der Hochfrequenz-Entladung — und damit deren Volumen — entsprechend zum Audio-Signal. Da diese Änderungen ziemlich trägheitslos erfolgen, eignen sich Ionen-Lautsprecher speziell für Hochton-Lautsprecher.

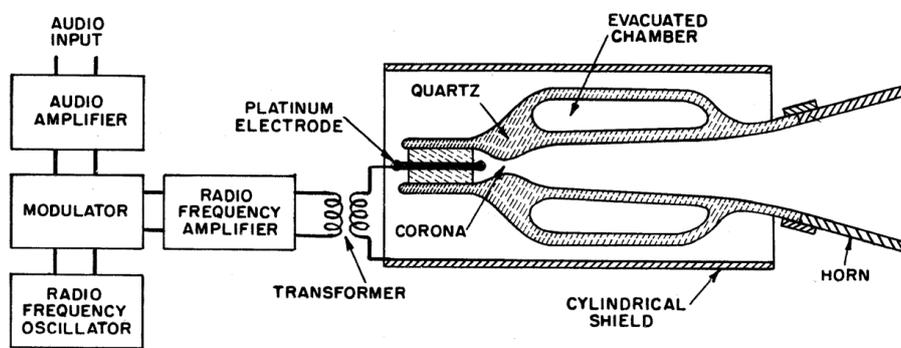


Bild 7.4: Prinzip des Ionen-Lautsprechers

Die verwendeten Skizzen sind den folgenden Werken entnommen:

Literatur

- [1] Newitt, J.H.: *High Fidelity Techniques*, Rinehart, 1953
- [2] Ghirardi, A.A.: *Receiver Circuitry and Operation*, Rinehart, 1955
- [3] Ghirardi, A.A.: *Receiver Troubleshooting and Repair*, Rinehart, 1955
- [4] Ghirardi, A.A.: *Radio Physics Course*, Farrar & Rinehart, 1942
- [5] Ghirardi, A.A.: *Modern Radio Servicing*, Murray Hill, 1935
- [6] Robeck, P.H. *Brummkompensation*, in: *Radio-Technischer Almanach*, 1947, pp 82 – 87, Deutsche Radiobücherei, Band 100, Jakob Schneider Verlag Berlin-Tempelhof; siehe auch:

http://www.radiomuseum.org/forum/gemeinsch_dke38_deutscher_kleinempfaenger_dke4.html#2
<http://www.radiomuseum.org/forumdata/upload/Brummkompensation%2Epdf>
<http://www.diru-beze.de/>
<http://www.diru-beze.de/radio/skripte/Brummkompensation.pdf>
- [7] Lehmann, W.: *Die Rundfunk- und Tonfilmtechnik*, 2.A., Killinger, 1932
- [8] Lehmann, W.: *Die Rundfunk- und Tonfilmtechnik*, 3.A., Killinger, 1935
- [9] Morecroft, J.H.: *Elements of Radio Communication*, Wiley, 1929
- [10] Terman, F.E.: *Fundamentals of Radio*, McGraw-Hill, 1938
- [11] Terman, F.E.: *Radio Engineering*, 2nd. ed., McGraw-Hill, 1937
- [12] Ardenne, M.v. (Hrsg.): *Handbuch der Funktechnik und ihrer Grenzgebiete* Bd.2, Frankh, 1935
- [13] Wiesemann, H.: *Praktische Funktechnik*, Frankh, 1939
- [14] Günther, H.; Richter, H.: *Lexikon der Funktechnik*, Frankh, 1943
- [15] Nesper, E.: *Der Radio-Amateur*, 4.A., Springer, 1924
- [16] Nesper, E.: *Der Radio-Amateur*, 6.A., Springer, 1926
- [17] Papst, B.: *Bauelemente der Rundfunktechnik*, VT, 1964
- [18] Blake, G.G.: *History of Radio Telegraphy and Telephony*, Chapman & Hall, 1928
- [19] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*, Bd. 1, 5.A., Saur, 1987
- [20] Trendlenburg, F.: *Einführung in die Akustik*, 3.A., Springer, 1961
- [21] Waetzmann, E. (Hrsg): *Technische Akustik*, Teil 1, VAG, 1934
- [22] Olson, H.F.: *Musical Engineering*, McGraw-Hill, 1952
- [23] Olson, H.F.: *Acoustical Engineering*, van Nostrand, 1957
- [24] Reichardt, W.: *Grundlagen der technischen Akustik*, VAG, 1968
- [25] McLachlan, N.W.: *Loud Speakers*, Clarendon, 1934
- [26] Camm, F.J.: *Practical Wireless Encyclopaedia*, Newnes, 1954
- [27] Henney, K.: *The Radio Engineering Handbook*, 2nd. ed., McGraw-Hill, 1935
- [28] Bahr, H.: *Philips Lehrbriefe*, Bd.1, 10A., Hüthig, 1982