

Elektrostatische Lautsprecher : Übersicht



- Wandlerprinzipien
- Funktionsweise:
 - Grundprinzip
 - Gegentakt-System
 - Linearität
- Weiterentwicklungen
- Aufstellung im Raum
- Vor- und Nachteile
- Fazit
- Quellen



Elektrostatische Lautsprecher : Wandlerprinzipien



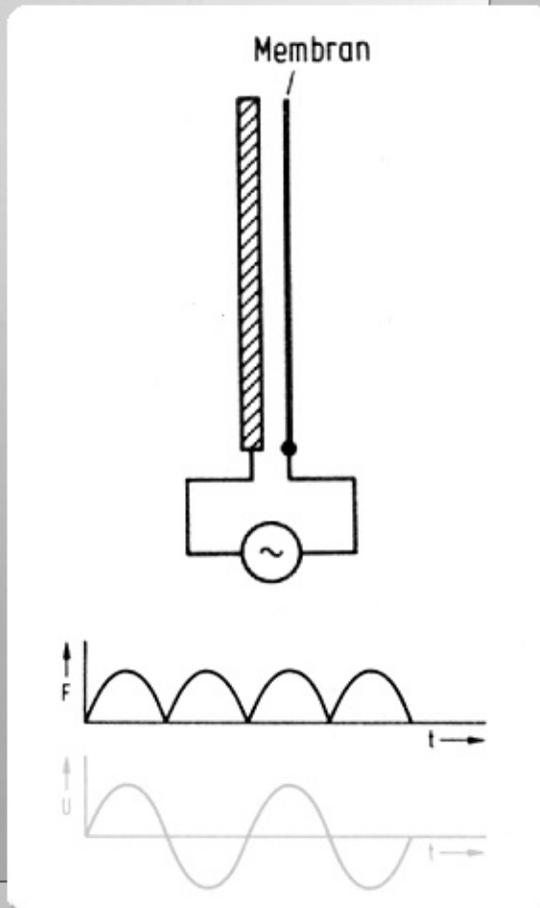
Analog zur Aufnahmeseite gibt es in der Audio-technik auch auf der Wiedergabeseite zwei wesentliche Wandlerprinzipien: dynamische und elektrostatische Wandlung.

Weite Verbreitung (besonders im Konsumerbereich) finden vor allem dynamische Boxen, d.h. also Systeme, die über stromdurchflossene Schwingspulen im Magnetfeld angetrieben werden - die bekannten Konus- oder Kalottenlautsprecher.

Ein wenig im Schatten der dynamischen Lautsprecher existieren aber auch sehr hochwertige Systeme, die nach dem Kondensator-Prinzip arbeiten. Die Wandlung von elektrischen Schwingungen in akustische ergibt sich also über die Kraftwirkung, die elektrische Ladungen zwischen zwei Kondensatorplatten aufeinander ausüben.



Elektrostatische Lautsprecher : Funktionsweise

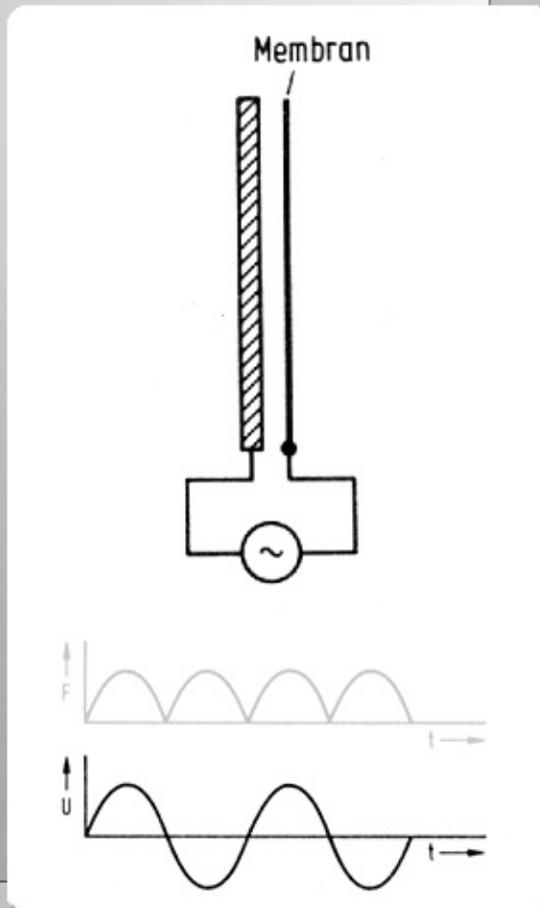


In der einfachsten Form besteht so ein elektrostatischer Lautsprecher (ESL) aus einer feststehenden Kondensator-Platte und einer hauchdünnen beweglichen Metallfolie (bzw. einer mit einer Metallschicht überzogenen Kunststoffolie) - der Membran.

Darin liegt der Hauptvorteil: Die Membran hat selbst so wenig Masse, daß nahezu eine absolut gleichmäßige Antriebskraft auf die gesamte Fläche - ohne Partialschwingungen oder nichtlineare Verzerrungen - möglich ist. ESLs zeichnen sich also durch eine hervorragende Impulswiedergabe aus. Allerdings ist dies nicht in allen Frequenzbereichen so unproblematisch...

Liegt nun an beiden Platten eine Wechselspannung (das Tonsignal) an, dann wird die Membran durch Änderung der elektr. Feldspannung periodisch entsprechend des Signals zur festen Platte hingezogen. Auf diese Weise entsteht allerdings noch keine sinusförmige Bewegung. Beide Halbperioden der Spannung lenken die Membran in dieselbe Richtung aus → keine Tonwiedergabe möglich.

Elektrostatische Lautsprecher : Funktionsweise

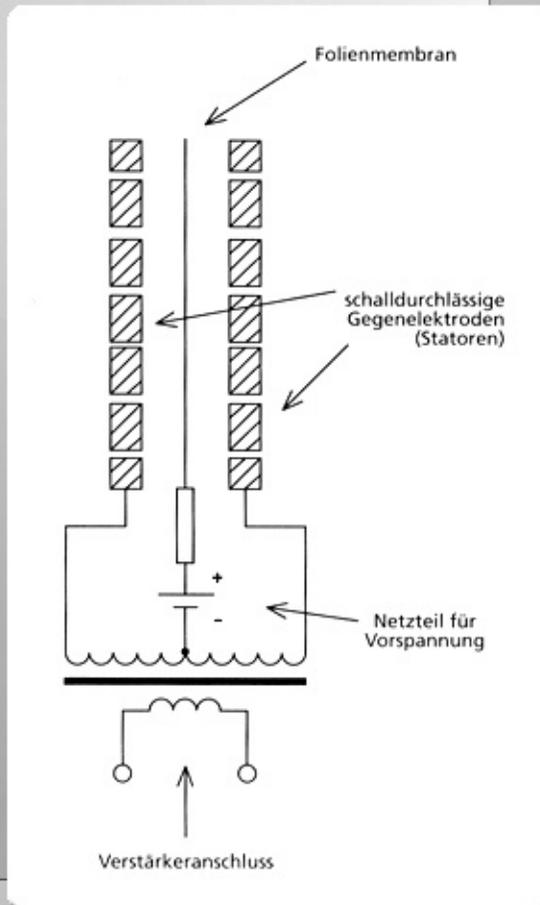


Möglich wird dies erst dadurch, daß zusätzlich in Reihe zur Wechselspannung eine sehr hohe Gleichspannung ("Polarisationsspannung") zwischen beide Kondensatorplatten gelegt wird. Dabei verteilen sich alle Ladungsträger möglichst gleichmäßig in einem homogenen Feld. Daher auch die Bezeichnung "Elektrostat" - also statisch - da die Ladung dann gleichmäßig verteilt ist und kein Ladungsträgertransport mehr stattfindet. Durch diese Vorspannung kann die Membran nun nach beiden Seiten um ihre Mittellage entsprechend der Sinusspannung schwingen.

Der Abstand zwischen den beiden "Kondensatorplatten" kann wegen der hohen Polarisationsspannung (bis zu 5000 V über einen Trafo) relativ groß gewählt werden, sodaß die Membran bei Ausschlag keinesfalls die gegenüberliegende Platte berührt (dadurch wäre der Lautsprecher zerstört). Um dennoch eine ausreichende Kraftwirkung durch die Spannung des Tonsignals zu erreichen, muß diese schließlich auch auf einige 100 V hochtransformiert werden.



Elektrostatische Lautsprecher : Funktionsweise



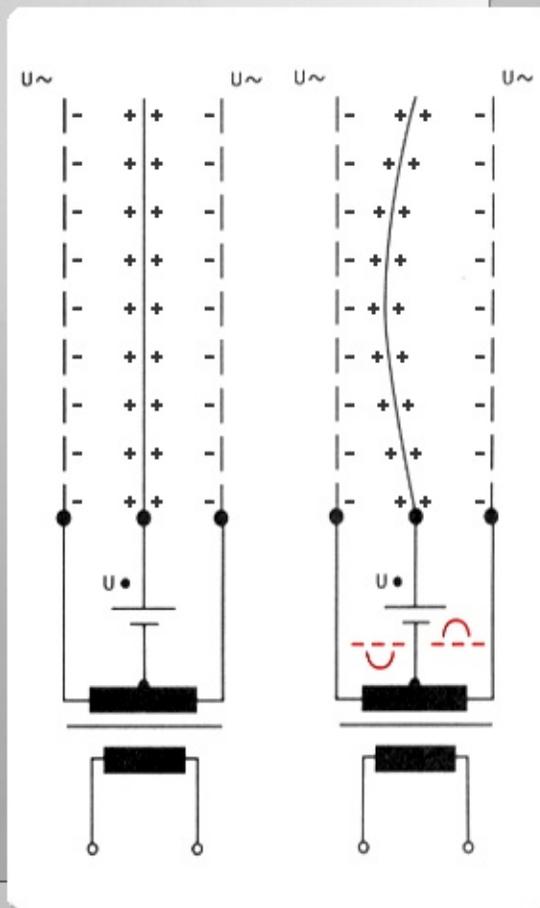
Da die Amplitude der (Ton-)Wechselspannung aber, wie gesagt, stets kleiner sein muß als die Polarisationsspannung, wäre ein Kondensatorlautsprecher in dieser einfachsten Form trotzdem nur als Hochtöner (wegen der geringeren Amplituden in diesem Frequenzbereich) einsetzbar.

Das Problem der brengezten, maximal möglichen Amplituden ist gleichzeitig auch das Hauptproblem der Elektrostaten.

Abhilfe schafft bis zu einem gewissen Grad das Gegentakt-Prinzip, anhand dessen sich auch größere Signalspannungen (d.h. tiefe Frequenzen) verarbeiten lassen. Die Membran befindet sich dabei zwischen zwei festen Elektroden ("Statoren"), die natürlich schalldurchlässig und somit perforiert sein müssen.



Elektrostatische Lautsprecher : Funktionsweise



An die Membran wird die Polarisations- und an die beiden Statoren die Signalspannung jeweils gegenphasig angelegt.

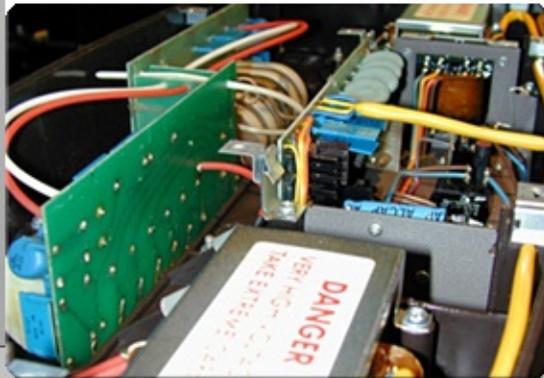
Daraus ergibt sich ein Push&Pull-Prinzip: Die resultierende Kraft wirkt von beiden Seiten auf die Membran, welche entsprechend des Signals (s. Beispiel links) von der einen Seite angezogen und gleichzeitig von der anderen abgestoßen wird. Insgesamt wird hierdurch der Wirkungsgrad erhöht.



Elektrostatische Lautsprecher : Funktionsweise



$$F \sim \left[\frac{U + \frac{u}{2}}{d_2} \right]^2 - \left[\frac{U - \frac{u}{2}}{d_1} \right]^2$$



Da aber bei Annäherung der Membran an einen der Statoren die mechanische Anziehungskraft nicht proportional der Signalspannung wäre, käme es so zu Verzerrungen. D.h. wenn sich der Abstand zwischen ihnen linear verkleinert, würde die Anziehungskraft quadratisch ansteigen (s. Formel links).

Dem begegnet man, indem man die Membran nur zu Beginn (beim Einschalten der Boxen) auf eine bestimmte Spannung U auflädt und die Zufuhr danach abschaltet. Die Ladungsmenge Q ist somit festgelegt und wird konstant gehalten durch einen Hochohmwiderstand unterhalb der Membran.

Bei Annäherung der Platten steigt jetzt nur die Kapazität C , wodurch die Vorspannung U fällt ($U=Q/C$). Die abnehmende Vorspannung wirkt jetzt wie ein linearisierendes Gegengewicht zum quadratischen Anstieg der Anziehungskraft. Diese ist dadurch nun direkt proportional zur Signalspannung.



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen

hartverwarmend

Er is een heel goede reden waarom de QUAD electrostatische luidspreker sprekend op een radiator lijkt. Het is een radiator.

Een afstraler van geluid. De vorm is zo functioneel als maar kan. En terecht. De maar na: het bewegende oppervlak van meer dan 2/3 m² zorgt voor superieure woergave van het laag.

De bewegende massa die maar liefst 200 maal kleiner is dan van de gebruikelijke papier conus, garandeert het mooiste hoog. En het midden?

Wat dacht u? Welke luidspreker kan beter de afwezigheid van een kast suggereren dan de ESL die geen kast heeft?

Evenzo zijn alle QUAD-componenten voor de best mogelijke



TransTec nv
Rotterdam
Schiedamscheveerd 67
Tel. (010) 14.70.55

Ausgehend von diesem Grundprinzip des ESLs (erste Versuche werden übrigens bereits auf das Jahr 1930 datiert - damals fungierte noch eine gespannte Schweinehaut als Membran) wurde die Entwicklung dann in den 50ern im Hause Quad von Peter J. Walker vorangetrieben. Der erste der breiten Öffentlichkeit vorgestellten Vollbereichs-Elektrostaten - der ESL-57 (s. Abb.) - trug aufgrund der damals absolut neuen Technik und Klangqualität auch den Beinamen "Walker's Little Wonder".

Quad ist heute nachwievor eine der wenigen Firmen, die Vollbereichs-Elektrostaten entwickeln - durch das Know-How aus 50 Jahren Entwicklung und hervorragende Veröffentlichungen gilt die englische Firma quasi als Referenz im Bereich der Elektrostaten...



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen

hartverwarmend

Er is een heel goede reden waarom de QUAD electrostatische luidspreker sprekend op een radiator lijkt. Het is een radiator.

Ein abstrakter van geluid. De vorm is zo functioneel als maar kan. En terecht. De maar na: het bewegende oppervlak van meer dan 2/3 m² zorgt voor superieure woergave van het laag.

De bewegende massa die maar liefst 200 maal kleiner is dan van de gebruikelijke papier conus, garandeert het mooiste laag. En het midden?

Wat dacht u? Welke luidspreker kan beter de afwezigheid van een kast suggereren dan de ESL die geen kast heeft?

Evenzo zijn alle QUAD-componenten voor de best mogelijke



TransTec nv
Rotterdam
Schiedmaaveel 67
Tel. (010) 14.70.55

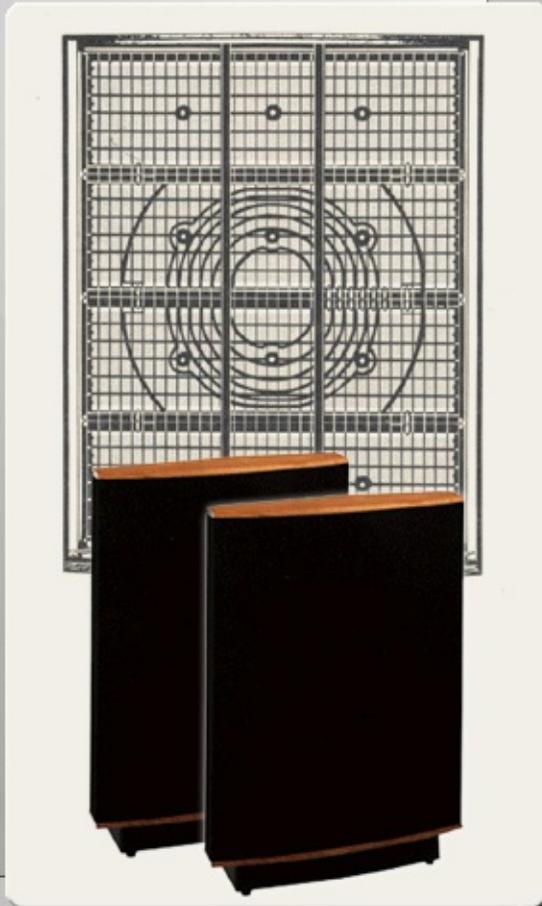
Schon bei diesem ersten Modell handelt es sich nicht mehr um EINEN großen Kondensator, sondern der Lautsprecher ist in mehrere Segmente für die unterschiedlichen Frequenzbereiche unterteilt.

So werden für Mittel- und Hochtöner nicht die vollen 5 kV Polarisationsspannung benötigt. Und auch der Abstand der Statoren kann geringer sein, da die Pegelausschläge in diesen Bereichen nicht so mächtig sind → größerer Wirkungsgrad.

Als "legendär" gilt nachwievor seine Mittenwiedergabe, weshalb das Paar auch noch heute (trotz knapp 50 Jahre alter Technik) für ca. 4.000,- gehandelt wird.



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen



Im Jahr 1981 erschien der Nachfolger ESL-63, der satte 18 Jahre Entwicklung hinter sich hatte (ab 1963 - deshalb auch die Bezeichnung). Haupt-Augenmerk lag dabei auf der Bekämpfung bzw. Lockerung des "Sweet-Spots".

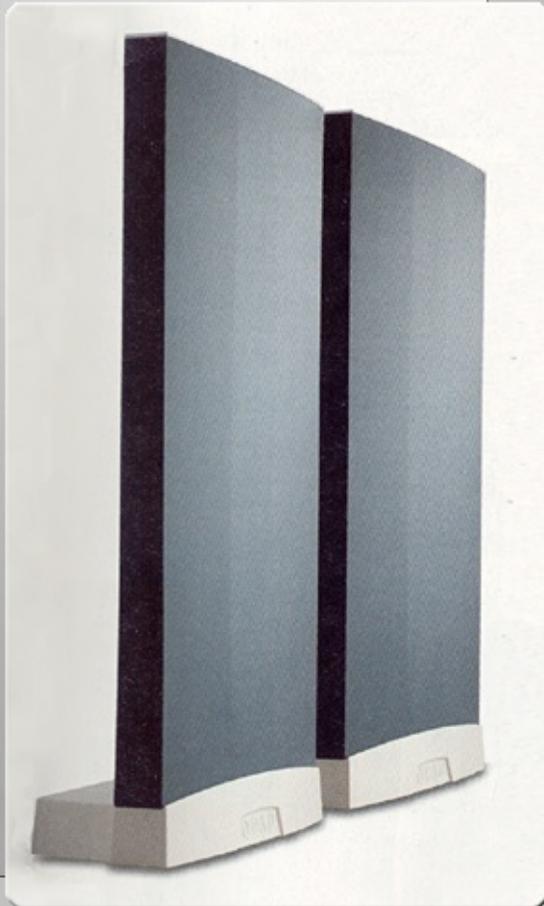
Auf den Mittelton-Segmenten sind dazu ringförmige, konzentrische Leiterbahnen angebracht (s. Abb.). Diesen wird das Tonsignal von innen nach außen zeitverzögert und stufenweise geschwächt zugeführt. Dadurch entspricht das wahrgenommene Schallfeld weniger dem eines Flächenstrahlers, sondern eher dem eines Punktstrahlers, der sich ca. 30 cm hinter der Membran befindet. Der Schall breitet sich so kugelförmiger aus und es ergibt sich ein größerer Hörbereich.

Das "Sweet Spot"-Problem ist dadurch aber nicht völlig aus dem Weg geräumt - nachwievor fällt dieser bei ESLs stärker ins Gewicht als bei dynamischen Lautsprechern.

(Paarpreis ESL-63: 5.250,-)



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen



Waren es beim ESL-63 noch insgesamt vier unterschiedliche Frequenz-Segmente, so sind beim 99er-Modell ESL-989 nochmal zwei zusätzlich für den Bass hinzugekommen (da in diesem Bereich nachwievor die Schwächen der ESLs liegen).

Um einen höheren Schalldruck zu erreichen, sind schließlich noch die Abstände der Statoren in der Membran-Mitte vergrößert worden, da die Folie hier natürlicherweise mehr Hub hat als an der Rändern, wo sie eingespannt ist.

(Paarpreis ESL-989: 7.800,-)



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen



Außer von Quad werden Elektrostaten meist nicht als Komplettlösung (Vollbereichs-Elektrostaten) konzipiert.

Häufiger kommt es vor, daß das System als Hybrid von einem dynamischen Subwoofer unterstützt wird - abgebildetes Beispiel: Martin Logan Summit aus dem Jahr 2005. Den tiefen Frequenzen kann so mehr Spielraum gegeben werden, um somit u.a. auch die maximal mögliche Lautstärke zu erhöhen.

(Paarpreis Summit: 12.000,-)



Elektrostatische Lautsprecher : Weiterentwicklungen



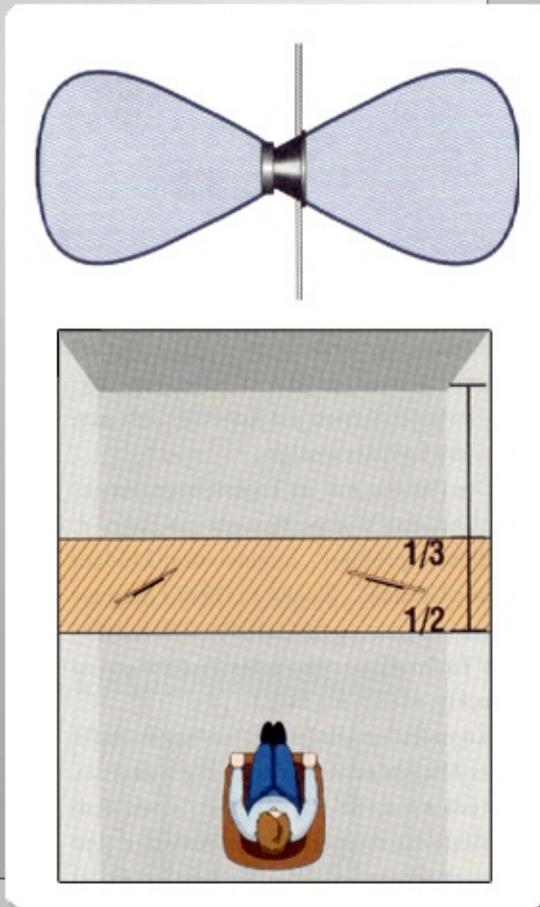
Eine andere Variante dieser Hybrid-Systeme ist, daß nur die Hochtöne durch einen ESL wiedergegeben werden - wie z.B. bei der T+A TCI -Serie.

Der dort verwendete Elektrostat (s. Abb. unten rechts) ist stark gewölbt und hat dadurch ein wesentlich besseres Rundstrahlverhalten.

(Paarpreis TCI 1A: stolze 20.000,-)



Elektrostatische Lautsprecher : Aufstellung im Raum



Reine Elektrostaten sind logischerweise Dipole, was die Abstrahlung angeht. Der Schall wird also zu gleichen Anteilen nach vorne und hinten abgestrahlt. Da dies aber, wie vorhin erwähnt, genau gegenphasig geschieht, sollten unbedingt 70-100 cm Aufstellungsabstand zur nächsten Wand eingehalten werden (ideal wäre die Aufstellung in der Raummitte). Ansonsten drohen Klangverfälschungen (Interferenz, Phasenauslöschung) durch Direktreflexion an der Wand.

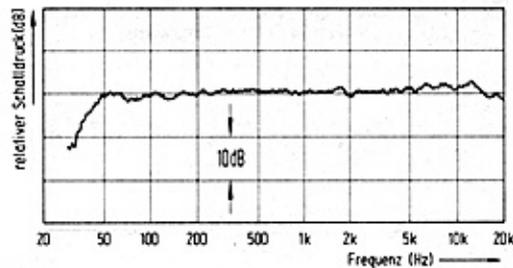
Außerdem ist es ratsam, die Boxen nicht direkt auf den Boden zu stellen, da sonst die Wiedergabe der tiefen Frequenzen unlinear wird. Mindestens 30-35 cm Bodenabstand werden empfohlen.

Insgesamt ist es unterm Strich sehr sinnvoll, die Aufstellungsposition der ESLs sorgfältig zu analysieren, da der "Sweet Spot", wie erwähnt, trotz aller Modifikationen am Grundprinzip relativ stark ins Gewicht fällt.

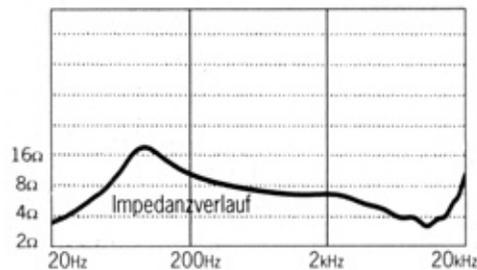


Elektrostatische Lautsprecher : Vor- und Nachteile

Übertragungskennlinie:
QUAD ESL-63



Impedanzverlauf:
QUAD ESL-989



Vorteile der ESLs sind vor allem die gleichmäßige Antriebskraft auf der gesamte Membranfläche (jeder Punkt der Membran hat quasi einen dazugehörigen Antriebsanteil) und die sehr geringe Masse derselben. Rücksicht auf eine mögliche Trägheit des Antriebssystems muß somit nicht genommen werden.

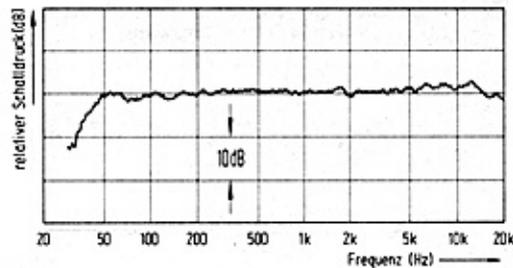
Im Vergleich zu dynamischen Lautsprechern zeichnen sie sich deshalb durch ein hervorragendes Impulsverhalten mit sehr geringen nicht-linearen Verzerrungen, Klirrfaktoren $< 0,5\%$ und quasi keinen Partialschwingungen aus. Der Phasengang ist also annähernd perfekt und unverfälscht (s. Übertragungskennlinie ESL-63). Elektrostaten bestehen besonders bei sehr hohen Frequenzen, bei denen die Masseträgheit dynamischer Systeme einschränkend wirkt. Theoretisch können mit ESLs Frequenzen bis 100 kHz wiedergeben werden.

Das hervorragende räumliche Abbildungsvermögen und die Natürlichkeit und Klarheit der Wiedergabe über ESLs ist im Grunde einzigartig.

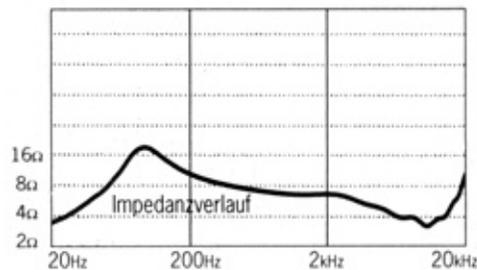


Elektrostatische Lautsprecher : Vor- und Nachteile

Übertragungskennlinie:
QUAD ESL-63



Impedanzverlauf:
QUAD ESL-989



Problematisch für einige Verstärker ist zum einen der kapazitive Impedanzverlauf (s. Abb. ESL-989). Zum anderen zeigen Elektrostaten, wie erwähnt, Schwächen im Bass-Bereich - können hier nicht mit guten Tauchspulenlautsprechern mithalten.

Im Vergleich lassen sich auch nicht so große Abhörlautstärken erreichen (bis 98dB beim aktuellen Quad-Modell ESL-2905), da die Dynamik durch die Konstruktion (die geringe maximale Membranauslenkung) begrenzt ist. Bei höheren Pegeln greift die interne Schutzschaltung.

Sobald außerdem die Schallwellenlänge die Größe der Membran übersteigt (tiefste Frequenzen), löschen sich die vorder- und rückseitig gleichzeitig abgestrahlten Schallanteile aus. Vollbereichs-Elektrostaten sind daher zwar nur einige Zentimeter tief, aber in der Breite sehr großflächig.



Elektrostatische Lautsprecher : Fazit



Durch die Möglichkeiten der geringen Membranzmasse und dem an jedem Punkt gleichmäßigen Antrieb sind selbst Konstruktionen mit einer Fläche bis zur Wandgröße realisiert worden.

Aufgrund der genannten Vor- und Nachteile sind Elektrostaten als Studiomonitore aber v.a. in reinen Klassik-Studios zu finden, wo es besonders auf die räumliche Auflösung und exakte Abbildung bei aber nicht übertrieben hohen Lautstärkepegeln ankommt.

(Abb.: Tritonus Studio in Stuttgart)



Elektrostatische Lautsprecher : Quellen

Lautsprecher und Lautsprechergehäuse für HiFi, Hans Herbert Klinger
(Franzis-Verlag, München)

Arbeitsbuch für Lautsprechersysteme, Heinz Sahm
(Franzis-Verlag, München)

Handbuch der Tontechnik, Michael Dickreiter
(K.G. Saur Verlag KG, München)

Monitoring - Lautsprecher in Studio und HiFi-Technik, Thomas Görne & Steffen Bergweiler
(PPVMedien GmbH, Bergkirchen)

Stereoplay 9/04, 7/05, 3/06
(Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG)

www.quad-hifi.de
www.quad-audio.de
www.martinlogan.com
www.taelektroakustik.de