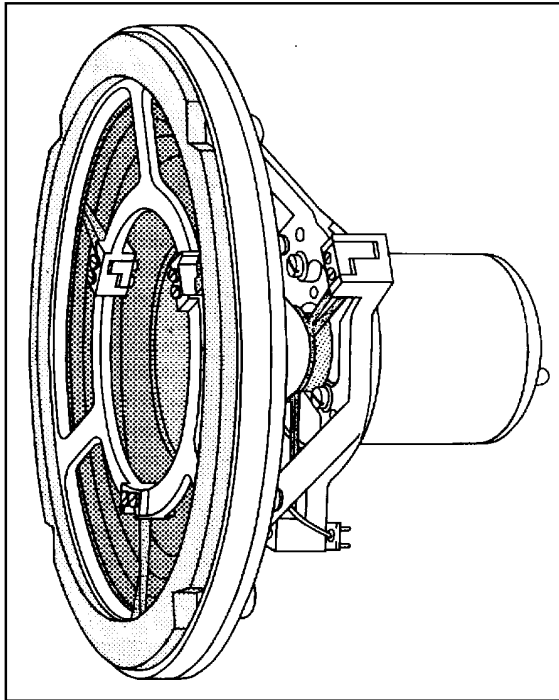


Jürg Jecklin
floatsound@bluewin.ch

5. Lautsprecher



Ueberblick Scripts

Theorie der Tontechnik

1. Geschichte der Tontechnik	tt01.pdf
2. Gehör	tt02.pdf
3. Mikrofone	tt03.pdf
4. Schallquellen	tt04.pdf
5. Lautsprecher und Kopfhörer	tt05.pdf
6. Akustik und Raumbeschallung	tt06.pdf
7. analoge Audiotechnik	tt07.pdf
8. digitale Audiotechnik	tt08.pdf
9. Signalaufzeichnung	tt09.pdf
10. Technik der Musikaufnahme	tt10.pdf
Anhang	
Grundlagen	ttA.pdf

Tontechnik special

Aufnahmen	ttspecial. aufnahmen
Grundlagen	ttspecial.grundlagen
Lautsprecher im Raum	ttspecial. L-imraum
Mhs2	ttspecial.mhs2
Mikrofone	ttspecial.mikrofon
Musikakustik	ttspecial.musikakustik
Surround	ttspecial.surround

Inhalt

1. Grundlagen
2. der dynamische Lautsprecher
3. Schallführungen
4. Frequenzweichen
5. Hornlautsprecher
6. Lautsprecher in kleinen Räumen

Anhang

A1 Demo-CD 3 „Lautsprechertest“

Materialien zur Tontechnik

Computer	computer.pdf
Diverses	diverses.pdf
HD-Recording	hdrecording.pdf
Headphon	headphone.pdf
Lautsprecher	lautsprecher.pdf
Manuals	manuals.pdf
Mikrofone	microphone.pdf
Sound absorption	soundabsorption.pdf
Surround	surround.pdf
Technik	technik.pdf
Tube Data	tubedata.pdf

1. Grundlagen

1.1 Schallabstrahlung

1.1.1 Allgemeines

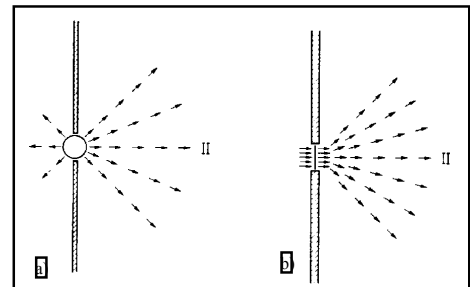
Ein schwingendes Gebilde gibt an die Luft Schwingungsenergie ab, die sich als Schall ausbreitet. Das Schwingungsgebilde verliert dabei Energie, und zwar so, als ob es auf einen Verlustwiderstand, einen *Strahlungswiderstand*, arbeiten würde. Gleichzeitig wird die Luft in unmittelbarer Nähe des Schwingungsgebildes mit hin und her bewegt. Die Masse dieser mitschwingenden Luft nennt man *mitschwingende Mediummasse*.

Die Grösse des Strahlungswiderstands und der mitschwingenden Luftmasse lassen sich am einfachsten für einen *Nullstrahler* ableiten:

- Ein Nullstrahler oder Strahler 0-ter Ordnung ist eine Kugel, deren Radius sich im Rhythmus der Tonfrequenz periodisch vergrößert und verkleinert.
- Die für einen Nullstrahler abgeleiteten Ergebnisse können auf eine Kolbenmembran übertragen werden.

Bild 1 zeigt einen Nullstrahler und eine Kolbenmembran. Beide sind in eine sehr große Schallwand eingebaut. Die Schallfelder I und II sind akustisch völlig getrennt.

Die Schallfelder II des Nullstrahlers und der Kolbenmembran sind in einem gewissen Abstand vom Strahler gleich, wenn die Strahler klein im Verhältnis zur Wellenlänge eines abgestrahlten Tones sind. In beiden Fällen wird ein Kugelschallfeld erzeugt.



1.1.2 Strahlungswiderstand R_s , mitschwingende Mediummasse M_s

Für eine atmende Kugel (Nullstrahler) gilt:

$$R_s = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho_0 \cdot c \quad (1)$$

$$M_s = 4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \quad (2)$$

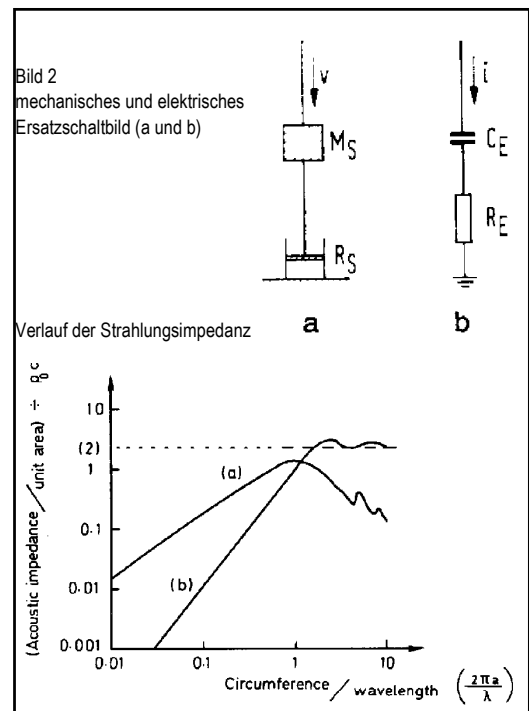
r Radius der Kugel ρ_0 Dichte der Luft,
 c Schallgeschwindigkeit

Bild 2

Die Strahlungsimpedanz besteht nun aus der Reihenschaltung von Strahlungswiderstand R_s und Scheinwiderstand der mitschwingenden Mediummasse. In Bild 2a ist das mechanische Ersatzschaltbild der Reihenschaltung: von Strahlungswiderstand und Scheinwiderstand der mitschwingenden Mediummasse dargestellt. Bild 2b zeigt das entsprechende elektrische Ersatzschaltbild.

In diesen zwei Ersatzschaltbildern entsprechen sich:

mechanisch	elektrisch
Geschwindigkeit v	Strom i
Masse M_s	Blindwiderstand C_e
Reibung R_s	Wirkwiderstand R_e



Für die Impedanz dieser Anordnung gilt :

$$1/Z = 1/R_s + 1/jM_s \quad (3)$$

Für eine Kolbenmembran mit dem Radius r ist

$$R_s = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho_0 \cdot c \quad (4)$$

$$M_s = 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \quad (5)$$

Bild 3

Für die Strahlungsimpedanz gilt dann:

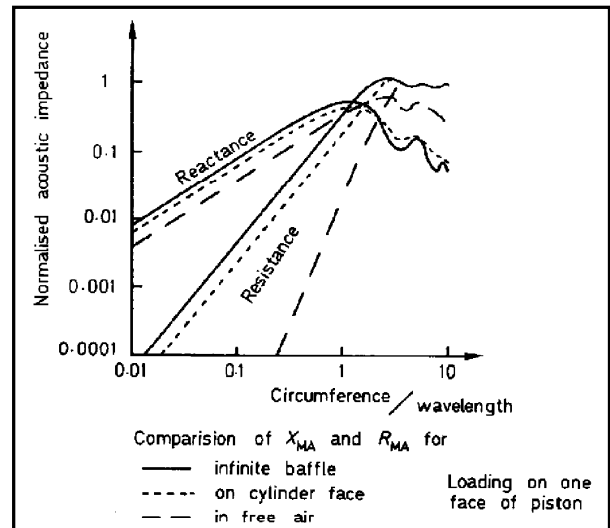
$$Z = 2\pi^2 S_0 c \frac{\left(\frac{\omega}{c} \cdot r\right)^2 + (j \frac{\omega}{c} \cdot r)^2}{1 + \left(\frac{\omega}{c} \cdot r\right)^2} = Z_r + Z_j \quad (6)$$

Für im Verhältnis zur Wellenlänge des abgestrahlten Tones kleine Membranen wird der Nutzanteil Z_r mit zunehmender Frequenz größer.

Für Z_r gilt in diesem Fall:

$$Z_r = ((2 \cdot \pi \cdot \rho_0) / c) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot r^4 \quad (7)$$

$$Z_r = ((2 \cdot \pi \cdot \rho_0) / c) \cdot \omega^2 \cdot r^4 \quad (8)$$



1.1.3 Leistung

Für die von einer Kolbenmembran in den Halbraum (nur Schallfeld oder II in Bild 2) abgestrahlte Leistung P_{ak} gilt:

$$P_{ak} = (1/2) \cdot Z_r \cdot v^2 = (1/2) \cdot a^2 \cdot \omega^2 \quad (9)$$

Z_r Nutzanteil des Strahlungsimpedanz, v Membranschnelle,
 a Membranauslenkung

und, kombiniert mit der Formel für den Strahlungswiderstand:

$$P_{ak} = (a^2 \cdot r^4 \cdot f^4) / (24 \cdot 10^{10}) \quad (10)$$

1.1.4 Schallbündelung

Ist die Wellenlänge klein zum Umfang der Membran, wird die Schallenergie gebündelt abgestrahlt.

Erklärung:

- Man denke sich die Membran in eine Anzahl von kleinen Membranen aufgeteilt. Jede dieser Teilmembranen ist klein im Verhältnis zur Wellenlänge des abgestrahlten Tones. Abgestrahlt wird so von jeder Teilmembran ein Kugelschallfeld. In der Achse der Membran addieren sich die Teilschallfelder. Neben der Mittelachse ist die Laufzeit der Teilschallfelder aber unterschiedlich, und die Summe abhängig vom Winkel und der Frequenz.

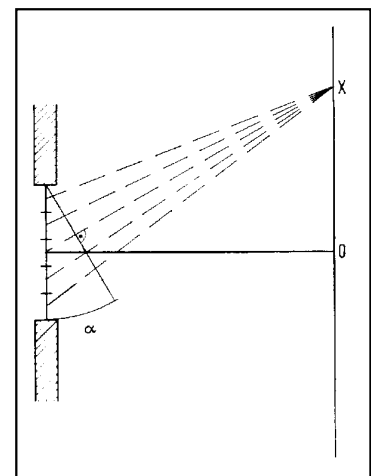


Bild 4

Die Richtcharakteristik ist keulenförmig, und es treten Seitenmaxima und -minima auf. Zusätzlich wird die Richtcharakteristik vom externen Schallführungen (Schallwände, Gehäuse, etc.) beeinflusst.

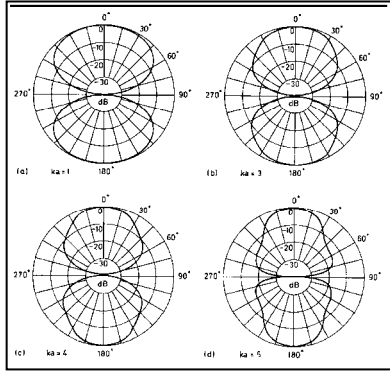


Bild 5 Freistrahlend

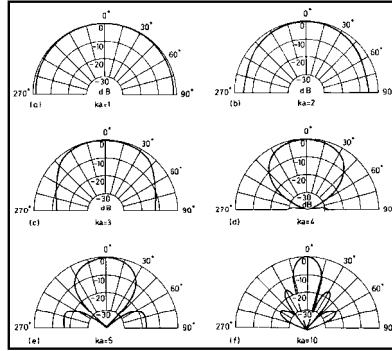


Bild 6 in unendlicher Schallwand

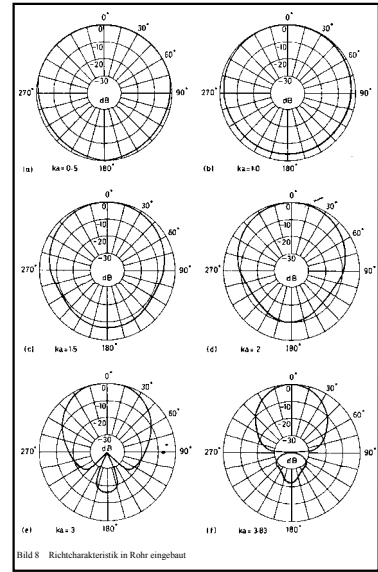


Bild 7 In Rohr eingebaut

Bild 8 Richtcharakteristik in Rohr eingebaut

1.2 Schwingendes System

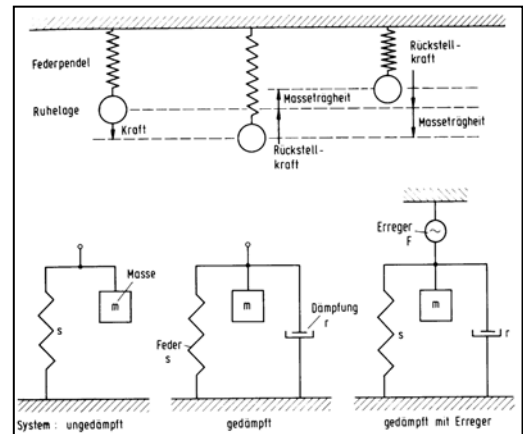
1.2.1 Kraftgesetz

In einem Lautsprecher bildet die Masse der Membran mit der Rückstellkraft der Einspannung ein einwilliges Schwingensystem mit einer Resonanzfrequenz.

Es gilt folgende Kraftgleichung:

$$K = m \cdot b + R \cdot v + D \cdot a \quad (11)$$

K angreifende Kraft, b Beschleunigung, v Schnelle, a Membranauslenkung, m Membranmasse
R Reibungswiderstand, D Direktionskraft der Einspannung.)



Ändert sich die antreibende Kraft sinusförmig, so gilt für die Schnelle v

$$v = a \omega \frac{k}{\sqrt{R^2 + (\omega m - \frac{D}{\omega})^2}} \quad (12)$$

$$\omega_0 = v (D/m) \quad (13)$$

v Effektivwert der Schnelle, k Effektivwert der Kraft, ω Kreisfrequenz, ω₀ Resonanzfrequenz

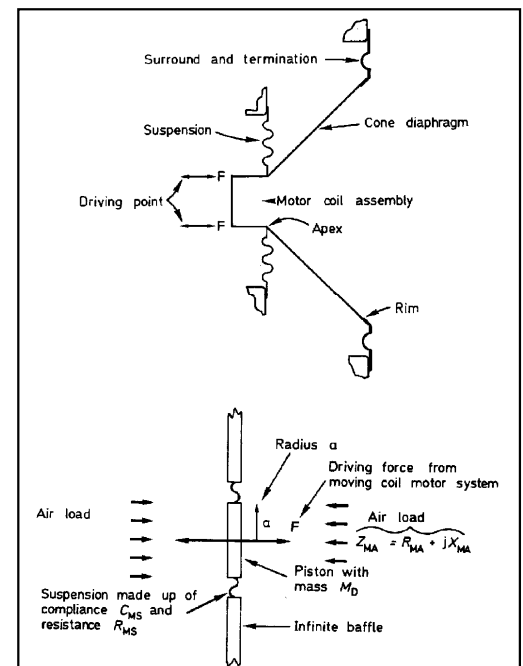


Bild 9 dynamische Lautsprechern als schwingendes System

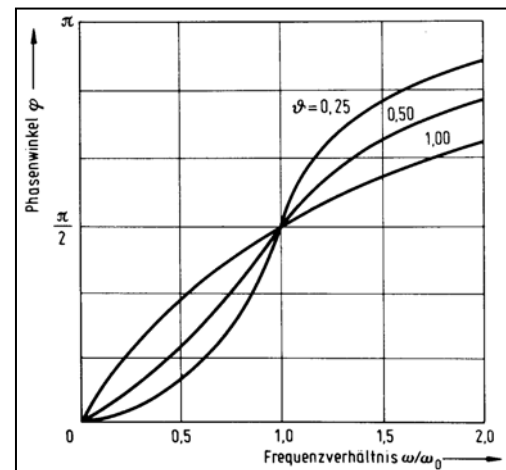
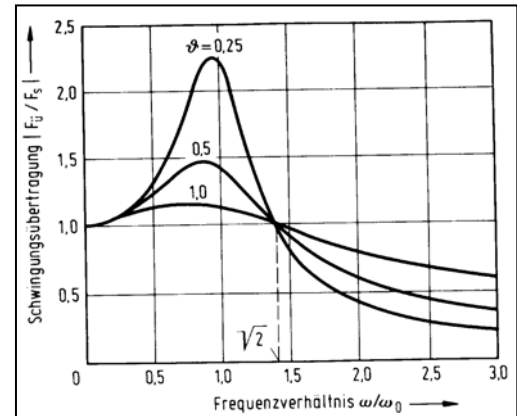
Betreibt man also ein solches System in einem großen Frequenzgebiet, so kann man für Frequenzen, die weit über oder unter f , liegen, folgende Näherungsbeziehungen aufstellen:

$$VT \text{ prop. } K / (\omega \cdot m) \quad \text{für } \omega \gg \omega_0 \quad (14)$$

$$VH \text{ prop. } (K \cdot \omega) / D \quad \text{für } \omega \ll \omega_0 \quad (15)$$

- Bei einem tief abgestimmten System nimmt die Schnelle mit der Frequenz ab, bei einem hochabgestimmten System nimmt die Schnelle mit der Frequenz zu.
- Beim tief- abgestimmten System ist die Masse m , beim hochabgestimmten System die Rückstellkraft D bestimmend für die Schnelle. Deshalb die Bezeichnungen massegehemmtes und elastizitätsgehemmtes System.

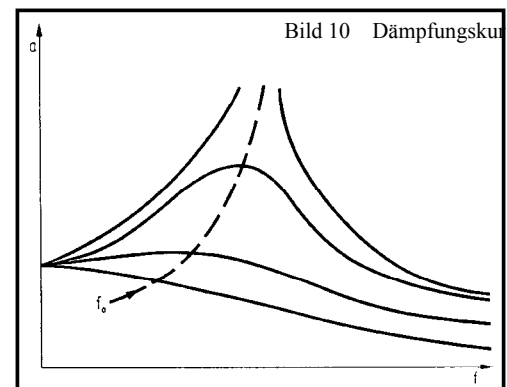
Bild 10/11 Frequenz- und Phasengang der erzwungenen Schwingung



1.2.2 Dämpfung (Bild 12)

Im Bereich der Resonanzfrequenz werden Membranauslenkung und Schnelle von der Dämpfung bestimmt (siehe Bild 6). Bei sehr großer Dämpfung wird die Resonanzfrequenz f_0 nach tieferen Frequenzen verschoben.

- Ein einmalig angestossenes Schwingssystem kehrt mit einer exponentiell abklingenden Schwingung in die Ruhelage zurück. Die Frequenz dieser Schwingung entspricht der Eigenfrequenz des Systems. Die Zeit, die verstreicht, bis das Schwingssystem in Ruhe ist, hängt von der Dämpfung ab.
- Ein aperiodischen gedämpftes kehrt asymptotisch in die Ruhelage zurück.



1.3 Dynamische Wandler

1.3.1 Antriebsprinzip

Beim Motor eines dynamischen Lautsprecher handelt es sich immer um einen stromdurchflossenen Leiter (zum Beispiel eine Schwingspule), der beweglich in einem Magnetfeld aufgehängt ist. Fließt ein Strom durch den Leiter, so erfährt er eine radial gerichtete Kraft K .

Es gilt:

$$K = B \cdot L \cdot i \quad (16)$$

B magnetische Induktion im Luftspalt des Magneten, L Leiterlänge, i Strom, der durch den Leiter fließt.

Da L und B unveränderliche Größen sind, hängt die Kraft K nur vom Strom i ab:

$$K \text{ prop. } i \quad (17)$$

Um den typischen Leistungsfrequenzgang eines dynamischen Lautsprechers zu ermitteln, muß in die Gleichung für die abgestrahlte Leistung die frequenzabhängige Membranschnelle bei konstantem Strom i , und damit bei konstanter Kraft K , eingesetzt werden.

Für das Frequenzgebiet unter der Resonanzfrequenz f_0 gilt:

$$P_{ak} = \frac{1}{2} \cdot Z_r \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi S_0}{c} \cdot r^4 \omega^2 \cdot \left(\frac{K}{\omega m}\right)^2 \quad (18)$$

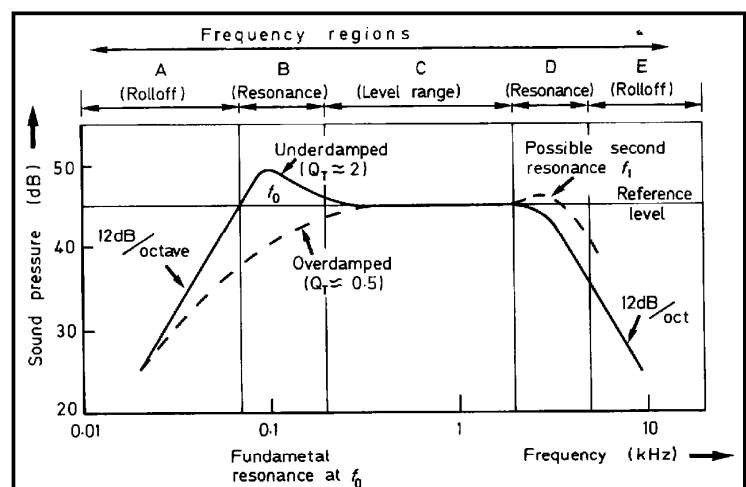
ω ist die einzige veränderliche Größe. Die abgestrahlte Leistung ist proportional der Frequenz hoch vier, sie nimmt mit der Frequenz um 12 dB/Oktave zu.

Für das Frequenzgebiet über f_0 gilt:

$$P_{ak} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi S_0}{c} \cdot r^4 \omega^2 \cdot \left(\frac{K}{\omega m}\right)^2 \quad (19)$$

Die abgestrahlte Leistung ist frequenzunabhängig, und der Frequenzgang eines dynamischen Lautsprechers weist vier unterschiedliche Bereiche auf (Bild 13):

- Bereich A: Die abgestrahlte Leistung ist frequenzabhängig und nimmt mit der Frequenz um 12 dB/Oktave zu.
- Bereich B: Bei der Resonanzfrequenz wird der Kurvenverlauf von der Dämpfung bestimmt.
- Bereich C: Die abgestrahlte Leistung ist frequenzunabhängig.
- Bereiche D und E: Da der Nutzteile des Strahlungswiderstandes Z , in einen konstanten Wert übergeht, nimmt die abgestrahlte Leistung mit 12 dB/Oktav ab. Sekundär-Resonanzen (Bereich D) und mit der Frequenz zunehmende Schallbündelung können diesen Abfall in einem gewissen Umfang kompensieren, zumindest in der Mittelachse des Lautsprechers.



1.3.2 Ersatzschaltbilder

Für einen dynamischen Lautsprecher kann man eine elektrische Ersatzschaltung angeben, in der die wesentlichen akustischen und elektrischen Größen von Lautsprecher und Schallfeld berücksichtigt sind.

In diesem Ersatzschaltbild entsprechen sich folgende mechanische und elektrische Größen:

mechanisch	elektrisch
Geschwindigkeit v	Spannung u
Kraft k	Strom i
mechanischer Leitwert	Widerstand R
Rückstellkraft D	Induktivität L
Masse m	Kapazität C

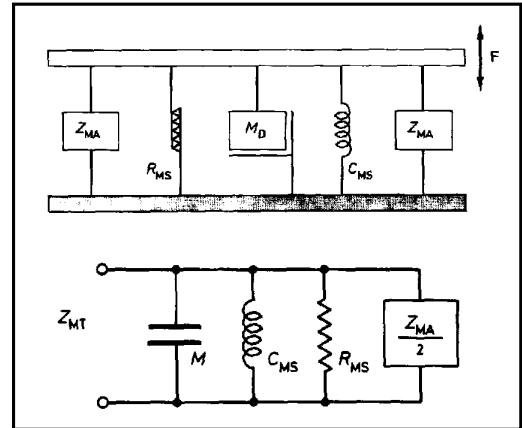


Bild 14

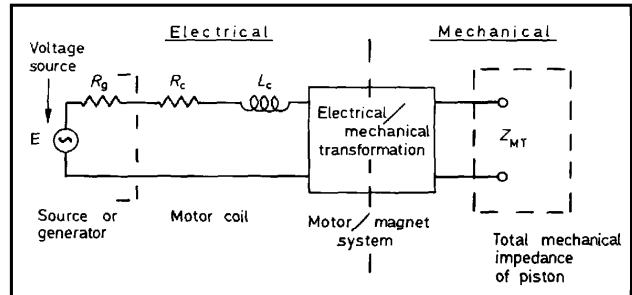
Nach dem Induktionsgesetz ist

$$u = B \cdot l \cdot v. \quad (18)$$

($B \cdot l = \text{Konstante } K$): Umrechnungsfaktor zwischen mechanischen und elektrischen Größen.

Aus dem Ersatzschaltbild (Bild rechts) ist unter anderem der Scheinwiderstandsverlauf, der Frequenzgang und der Wirkungsgrad des Lautsprechers ersichtlich:

Bild 15



1.3.3 Scheinwiderstand

Bild 16 zeigt den Verlauf der ohm'schen Komponente der Impedanz eines dynamischen Lautsprechers in der üblichen Darstellung.

Im Bild 17 ist die Ortskurve der Impedanz zu sehen:

Bei $f = 0$ Hz ist die Impedanz reell und gleich dem Gleichstromwiderstand R_{Sch} der Schwingspule.

zwischen $f = 0$ Hz und der Resonanzfrequenz f_0 steigt die Impedanz an. Sie ist in diesem Bereich induktiv.

Bei weiter zunehmender Frequenz wird der Scheinwiderstand kapazitiv und schließlich wieder induktiv.

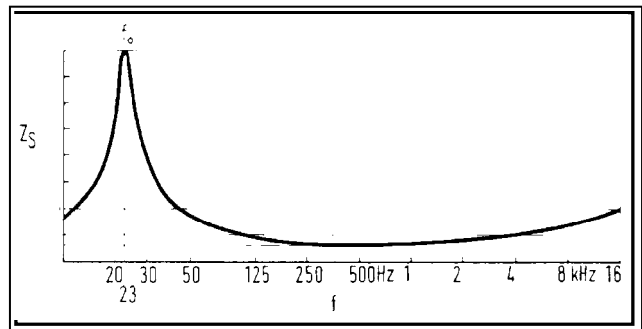
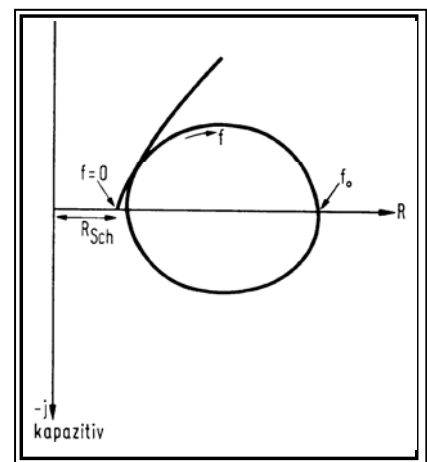


Bild 17



1.3.4 Frequenzgang:

Stellt man das Verhältnis U_E/U_A in Abhängigkeit von der Frequenz dar, so erhält man den Frequenzgang des Lautsprechers, für den das Ersatzschaltbild gilt. Da es aber zusätzliche, im Ersatzschaltbild nicht erfasste gibt, ist ein derart ermittelter Frequenzgang sehr ungenau.

1.3.5 Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} = \frac{U_A^2}{U_E^2} \cdot \frac{R_E}{K^2/R_S}$$

Diese Formel gilt, wenn der Lautsprecher die Schallenergie nicht gebündelt abstrahlt

1.4 Elektrostatische Wandler

Die Urform des elektrostatischen Lautsprechers, aufgebaut aus einer Festelektrode und einer Membran, hat eine quadratische Kennlinie. Mit einer Polarisationsspannung von etlichen hundert oder sogar tausend Volt wird der Arbeitsbereich so festgelegt, dass die durch die Kennlinie entstehenden Verzerrungen reduziert werden (ohne Vorspannung hat ein elektrostatischer Wandler einen K_2 von 100%!

Brauchbare Elektrostaten sind symmetrisch aufgebaut und arbeiten nicht nach dem Prinzip der konstanten Vorspannung, sondern nach dem Prinzip der konstanten Ladung. Ihre Arbeitsweise ist im Bereich der möglichen Membranauslenkungen linear.

Bild 18

1.4.1 Antriebsprinzip und Kraftgesetz

Bild 19 zeigt den Aufbau eines symmetrisch aufgebauten Elektrostaten:

zwischen den perforierten (schalldurchlässige) Festelektroden befindet sich eine bewegliche, elektrisch leitende Membran. An die beiden Festelektroden wird mit einem Übertrager die Tonfrequenzspannung u angelegt, an die bewegliche Membran eine Gleich-Vorspannung U . zwischen den perforierten (schalldurchlässige) Festelektroden befindet sich eine bewegliche, elektrisch leitende Membran. An die beiden Festelektroden wird mit einem Übertrager die Tonfrequenzspannung u angelegt, an die bewegliche Membran eine Gleich-Vorspannung U .

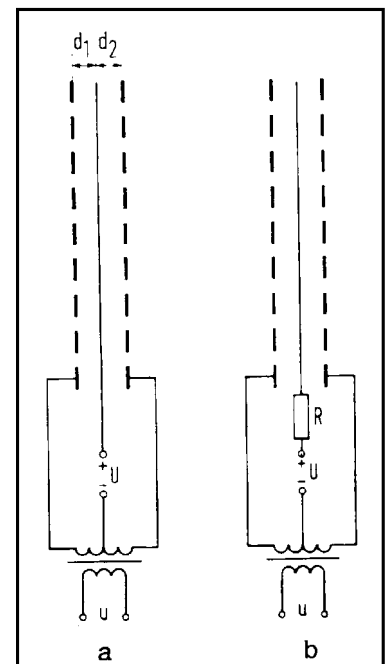
Für die auf die bewegliche Membran wirkende Kraft k gilt in diesem Fall:

$$k \sim \frac{(U + \frac{u}{2})^2}{d_1^2} - \frac{(U - \frac{u}{2})^2}{d_2^2} \quad (21)$$

d_1 und d_2 : Abstände zwischen Festelektroden und der Membran)

Die Beziehung zwischen der Tonfrequenzspannung und der antreibenden Kraft ist nichtlinear. Bei sich änderndem Elektrodenabstand d_1 und d_2 ändert sich die Kapazität und damit (bei konstanter Vorspannung U) die elektrische Ladung Q auf der Membran

$$(Q = C \cdot u).$$



Hält man die Ladung Q konstant, dann gilt folgendes Kraftgesetz

$$K \text{ prop. } u \cdot Q / (d_1 + d_2) \quad (22)$$

In diesem Fall ist $(d_1 + d_2)$ konstant. Die Beziehung zwischen der Wechselspannung u und der antreibenden Kraft k ist linear.

Damit im Betrieb die Ladung auf der Membran konstant bleibt, muss die Polarisationsspannung nach dem Aufladen der Membran "abgeschaltet" werden. In der Praxis wird zwischen Membran und Netzteil ein hochohmiger Widerstand eingefügt, über den die ständigen Ladungsverluste ausgeglichen werden.

- Wichtig: die Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ muss gross sein zur halben Periodendauer der Wechselspannung

1.4.2 Frequenzgang

Da die antreibende Kraft auf der ganzen Membranfläche angreift, kann die Membran ohne weiteres großflächig und leicht sein. Die Masse von Membranen aus Kunststoff, die mit einer dünnen, leitenden Schicht versehen sind, kann gegenüber der Masse der mitschwingenden Luft vernachlässigt werden. Die einzige mechanische Größe des Systems ist dann der Scheinwiderstand X_c der Membransteife, die der Rückstellkraft der Membraneinspannung beim dynamischen System entspricht.

Aus dem Verlauf vom Nutzanteil der Strahlungsimpedanz, der Impedanz der mitschwingenden Luftmasse und der Impedanz der Membransteife

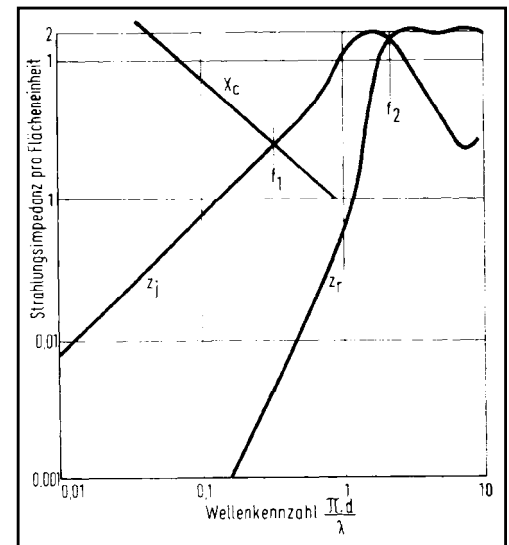
(Bild 19) geht folgendes hervor:

- Zwischen f_1 und f_2 ist die Membranbewegung massegehemmt. In diesem Bereich sind die Verhältnisse beim dynamischen und elektrostatischen Lautsprecher gleich.
- Der Membranmasse beim dynamischen entspricht die mitschwingende Luftmasse beim elektrostatischen System. Der Resonanzfrequenz f_0 beim dynamischen Lautsprecher entspricht die Frequenz f_1 beim Elektrostaten.
- Unterhalb von f_1 fällt die abgestrahlte Leistung mit 6 dB/Oktave ab.
- Im Frequenzgebiet über f_2 spielt die mitschwingende Luftmasse keine Rolle mehr. Der Nutzanteil der Strahlungsimpedanz ist der einzige kontrollierende Faktor. Er ist in diesem Bereich konstant und gleich dem Schallwellenwiderstand der Luft.

$$Z_r = \rho_0 \cdot c = 42 \Omega \text{ (akustisch)} \quad (23)$$

Folgendes ist typisch für einen symmetrisch aufgebauten Elektrostaten mit konstanter Ladung:

- Zwischen f_1 und f_2 ist der Frequenzgang wegen der Massehemmung der mitschwingenden Luft geradlinig.
- Im Frequenzgebiet über f_2 ist der Frequenzgang geradlinig wegen des konstanten Nutzanteils der Strahlungsimpedanz.
- Bei einer runden Membran ist die abgestrahlte Leistung in diesen zwei Bereichen aber nicht gleich groß. Bei f_2 tritt ein Pegelsprung von rund 3 dB auf. Da die mitschwingende Luftmasse von der kleineren Abmessung der Membran, der Nutzanteil der Strahlungsimpedanz aber von der Membranfläche abhängt, kann dieser Pegelsprung durch eine geeignete Membranform vermieden werden. Das ist bei einer streifenförmigen Membran der Fall



1.4.3 Anpassung

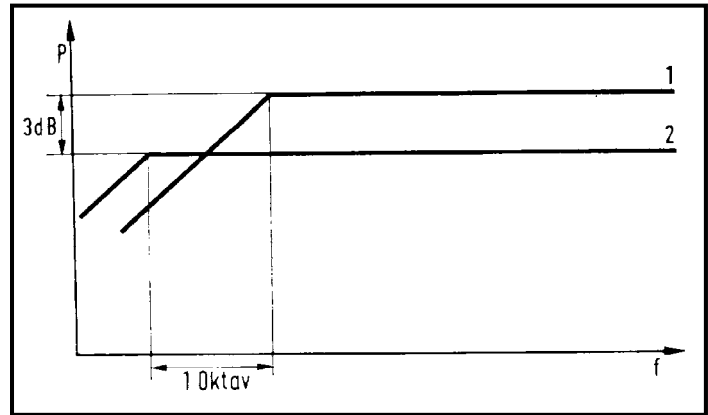
Elektrostatische Lautsprecher haben großflächige Membranen, die akustisch gut an die Luft angepaßt sind. Der mechano-akustische Wirkungsgrad ist deshalb groß.

Problematisch ist aber die Anpassung an einen Leistungsverstärker, für den sich der Lautsprecher wie eine rein kapazitive Last verhält, die nur am oberen Ende des abstrahlenden Frequenzbereichs richtig angepaßt werden kann.

Bild 20

Es ist aber möglich, Bandbreite und Wirkungsgrad gegeneinander "einzutauschen":

- Bei einem Abstand zwischen Membran und Festelektrode von $d = 1$ ergibt sich für den Frequenzgang die Kurve 1 in Bild 12.
- Bei doppelt so großem Abstand, also $d = 2$, kann die Membransteife halbiert werden, die untere Grenzfrequenz liegt dann eine Oktave niedriger (Kurve 2). Natürlich muss dann die Polarisationsspannung verdoppelt werden.
- Passt man nun den Verstärker wieder für die gleiche obere Grenzfrequenz (doppelt so große Impedanz), so steigt die Spannung am Verstärkerausgang um den Faktor $\sqrt{2} / 2$. Die Feldstärke u/d ist dann auf einen Wert von $\sqrt{2} / 2$ reduziert. Die Leistung nimmt um 3 dB ab.
- Der Wirkungsgrad ist also um so größer, je kleiner der abstrahlende Frequenzbereich ist. Wird der Hörbereich in zwei bis drei Teilgebiete aufgeteilt, ist ein Wirkungsgrad von einigen Prozent realisierbar.



1.5 andere Wandlertmöglichkeiten

Thermowandler

Bei diesen Wandlern wird die temperaturabhängige Dichte der Luft mit der Tonfrequenz moduliert.

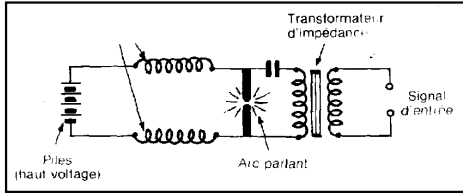
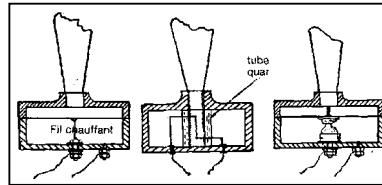
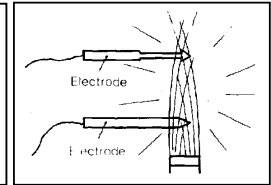


Bild 21 - 23 singender Lichtbogen

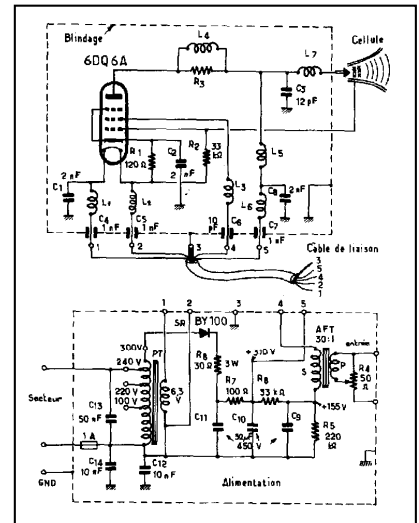
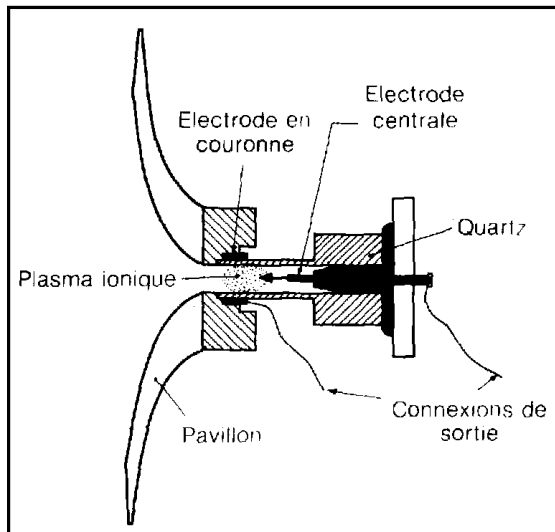


singender Draht



singende Flamme

Bild 24/25
Thermphon,
(Ionenlautsprecher)
mechanischer
Aufbau und Elekt-
ronik



Reibungs-Haftwandler (links)

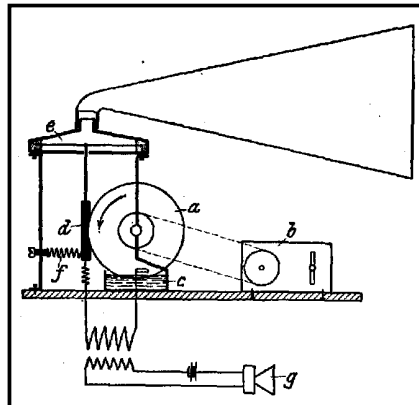
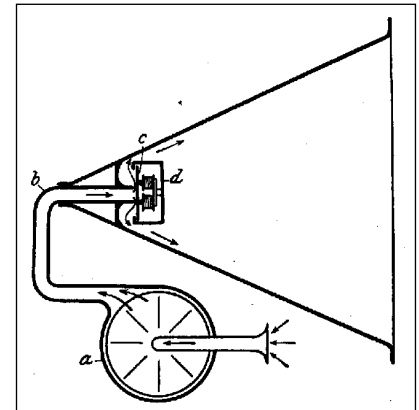


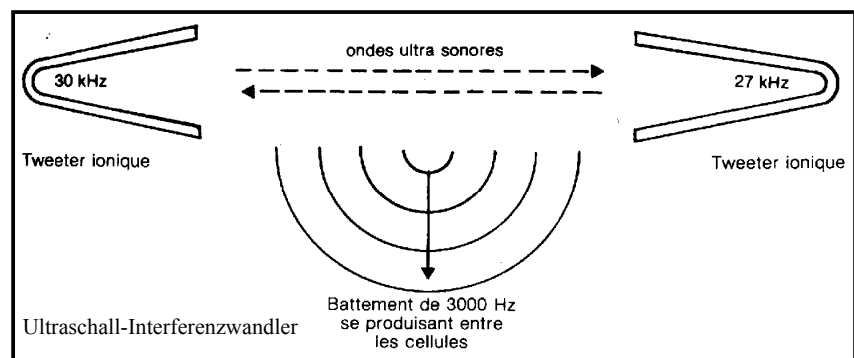
Bild 26

Relaiswandler (rechts)



Ultraschall-
Interferenzwandler

Bild 27



2. Dynamische Lautsprecher

2.1 Prinzip

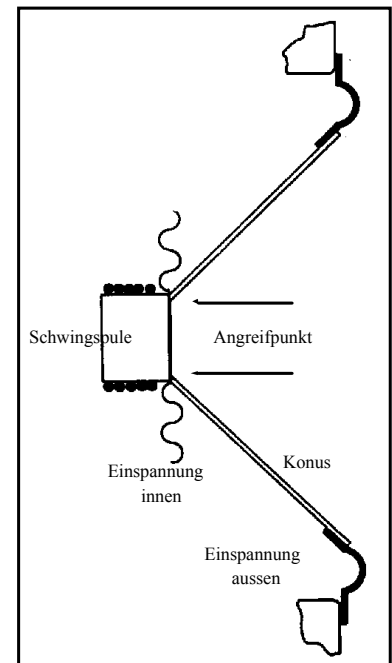
Eine Schwingspule als “Motor” für die Abstrahlfläche ist beweglich in einem Magnetfeld aufgehängt. Von einem durchfließenden, tonfrequenten Wechselstrom werden Schwingspule und Membran im Rhythmus der Frequenz dieses Stromes bewegt. Die Abstrahlfläche gibt an den Nutzanteil Z_r der Strahlungsimpedanz Schalleistung ab.

2.2 Abstrahlfläche

2.2.1 Abstrahleigenschaften

Z_r nimmt mit dem Quadrat der Frequenz zu, solange der Membrumfang klein zur Wellenlänge des abgestrahlten Tones ist. Da die Membranschnelle v bei einem tiefabgestimmten System mit zunehmender Frequenz quadratisch abnimmt, ergibt sich eine frequenzunabhängige Frequenzkurve:

- Die abnehmende Membranschnelle v wird gerade durch die Zunahme von Z_r kompensiert. Nach tiefen Frequenzen hin ist der Abstrahlbereich eines dynamischen Lautsprechers durch die Eigenfrequenz f_0 begrenzt.
- Die obere Frequenzgrenze eines dynamischen Systems ist ebenfalls festgelegt, da der Strahlungswiderstand einen konstanten Wert annimmt, sobald die Wellenlänge des abgestrahlten Tones kleiner ist als der Membrumfang (Bild 4). Durch die dann beginnende Schallbündelung wird diese Frequenzgrenze aber nach oben verschoben. Dies kann durch konstruktive Maßnahmen verstärkt werden. Trotzdem ist unter f_0 eine brauchbare Schallabstrahlung nur möglich, wenn durch eine Schallführung (zum Beispiel ein Gehäuse) und eine elektrische Korrektur der Abfall von 12 dB/Oktave kompensiert wird.



Und es ist in der Praxis nicht möglich, den ganzen Hörbereich mit einem einzigen Lautsprecher wiederzugeben:

- Resonanzfrequenz und Membrandurchmesser sind aus konstruktiven Gründen nicht voneinander unabhängig und frei wählbar.
- Die abgestrahlte Leistung wird von der Membranfläche bestimmt, was für die Wiedergabe der Tiefen eine bestimmte Lautsprechergröße voraussetzt.

Aus diesen Gründen muss der Hörbereich frequenzmässig aufgeteilt werden (zum Beispiel in einen Tiefton-, Mittelton- und Hochtonbereich), oder es werden mehrere kleine Systeme (die den ganzen Hörbereich wiedergeben können) parallelgeschaltet.

2.2.2 praktische Auslegung der Abstrahlflächen

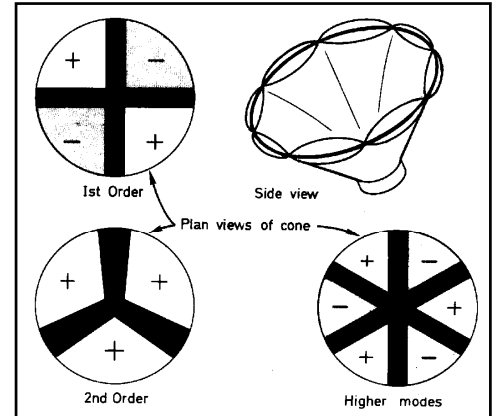
Angriffspunkt der antreibenden Kraft

Idealerweise müsste die antreibende Kraft auf die ganze Abstrahlfläche wirken. Das lässt sich aber bei einem dynamischen Lautsprecher mit einer Schwingspule als Motor nicht realisieren. In der Praxis führt die Abstrahlfläche immer ein "Eigenleben" mit kompliziert-unterteilten Eigenschwingungen.

Mit Hilfe der folgenden Massnahmen versucht man, dieses Problem in den Griff zu bekommen:

- Wahl eines geeigneten Membranmaterials,
- mechanisch sinnvolle Formgebung,
- komplexer Membranaufbau

Bild 29



Konusförmige Abstrahlflächen

Aus Gründen der mechanischen Stabilität wird die Abstrahlfläche von Tiefton-, Breitband-, und eventuell auch von Mitteltonlautsprechern als Konus konzipiert. Im Falle eines homogenen Konus (nur ein Material und

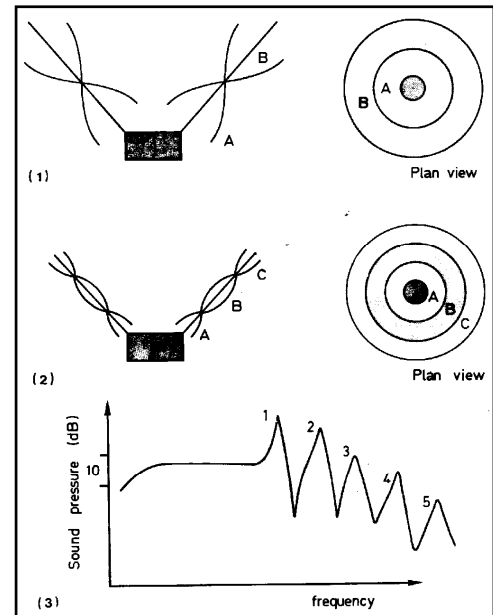
gleiche Dicke im ganzen Konus) treten die im Bild 34 und 35 gezeigten Teilschwingungen auf. Im Bild 27/3 ist der resultierende Frequenzgang des abgestrahlten Schalls zu sehen.

Die Teilschwingungsneigung von Kolbenmembranen lassen sich nicht beseitigen. Sie lassen sich durch einen geeigneten Membranaufbau nur vermindern oder bewusst in geeignete Frequenzgebiete verschieben.

Zum Beispiel mit folgenden Massnahmen:

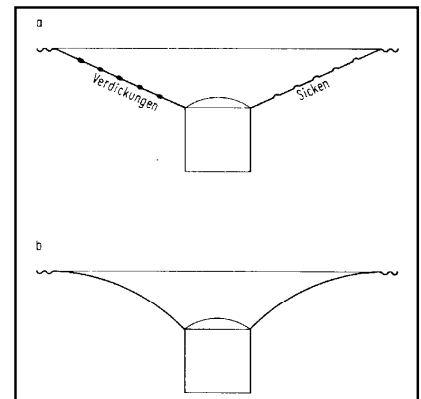
- Versteifung der Membran mit ringförmigen Verdickungen (Bild 36a). Teilschwingungen werden erschwert
- Einpressen von Sicken.
- Mit zunehmender Frequenz werden so äusseren Membranteile quasi "abgeschaltet". Im Idealfall treten keine Teilschwingungen mehr auf, denn die schwingende Konusfläche wird mit zunehmender Frequenz kleiner.
- Von der reinen Konusform abweichender Membranquerschnitt.. Bild 36b zeigt den Querschnitt einer nichtabwickelbaren Membran mit der sogenannten Navi-Membran.
- Durch den Einsatz von speziellen Membranmaterialien, entweder mit hoher innerer Dämpfung (Papierguss) oder versteifendem Aufbau (Sandwichkonstruktion)

Bild 31 eingepresste Sicken und Naviform (b)



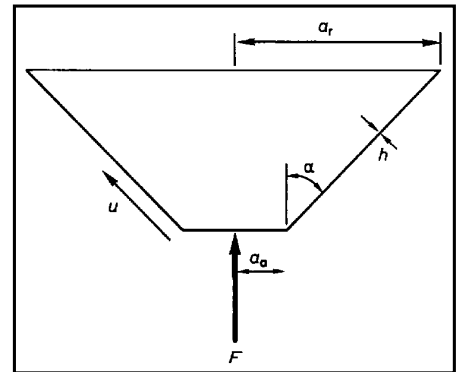
Teilschwingungen einer Konus-Membran

Lautsprecherdurchmesser (cm)	erste Teilschwingung (Hz)
38	500
30	570
24	600
16	900
10	1500
6	2000



Parameter, die bei einer Konusmembran eine Rolle spielen
 Bei den im Bild 32 eingezeichneten Parametern zur Beschreibung eines Lautsprecherkonus handelt es sich um folgendes:

- a_r Konus-Radius aussen
- a_0 Konus-Radius innen (bei Schwingspule)
- α Konuswinkel
- h Dicke der Membran
- u Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Membran
- E Young's modulus
- ρ Dichte des Membranmaterials
- ν Poisson-Verhältnis
- ? interner Verlustfaktor



Kalottenförmige Abstrahlfläche

Aufbau und resultierender Frequenzgang eines Kalottenlautsprechers mit den typischen Auswirkungen der Phasenauslöschung

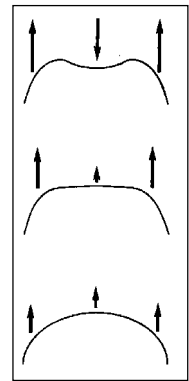
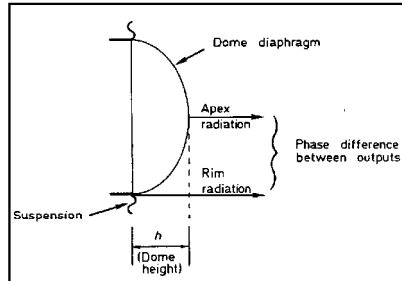
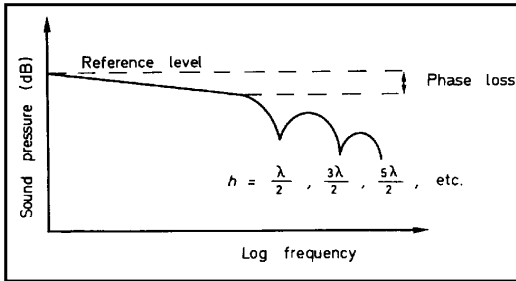
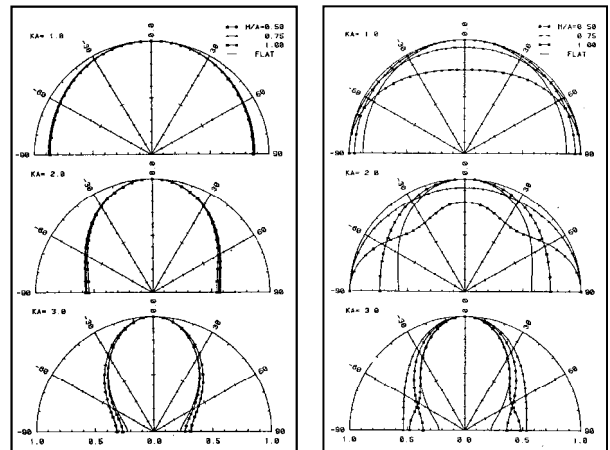


Bild 33, 34, 35 Schwingungsverhalten einer Kalottenmembran
 kolbenförmig, unterteilt-gleichphasig, unterteilt-gegenphasig

Bild 36,37
 Abstrahlcharakteristik konvexe Kalottenmembran und flache Abstrahlfläche



2.2.3 Eigenheiten der verschiedenen Membranmaterialien

Papierguss

Bereits der erste dynamische Lautsprecher von Kellogg und Rice aus dem Jahre 1927 hatte einen Abstrahlkonus aus Papier. Trotz anderer heute zur Verfügung stehenden Membranmaterialien mit theoretisch besseren Eigenschaften hat dieses alte Membranmaterial seine Bedeutung nicht verloren. Es gibt immer noch (und auch weiterhin) sowohl billige Lautsprecher, wie auch Chassis der absoluten Spitzenklasse mit Papierkonus. Heute werden Lautsprechermembranen meist aus Papierguss gefertigt und oft mit unterschiedlichen Materialien und Lacken imprägniert und/oder beschichtet.

typische Eigenheiten:

- grosse Eigendämpfung und wenig ausgeprägte Membranresonanzen (verursacht durch Teilschwingungen oder cone break up).
- linearer Frequenzgang
- gute Impulswiedergabe
- als "natürlich" und angenehm empfundener Klang

mögliche Probleme::

- Fertigungstoleranzen, die unter Umständen für identische Boxen (Stereowiedergabe) ein paarweises Ausschuchen notwendig machen.
- Abstrahl-Richtcharakteristik ist schwer und oft nur aufwendig zu kontrollieren (Möglichkeit: eingepressten Sicken)
- sich mit der Zeit veränderndes Membrangewicht (Austrocknen, Feuchtigkeitsaufnahme).

Bextren

Bextren ist ein "natürlicher" Kunststoff aus Zellulose. Bextren-Membranen sind mechanisch stabil und starrer als Papiermembranen. Sie neigen aber zu ausgeprägten Teilschwingungen und müssen deshalb mit einem Dämpfungsmaterial belegt werden.

Die Hoch-Zeit der Bextren-Membran waren die Siebzigerjahre. Die Eigenschaften der 5"- und 8"- Chassis mit Bextrenmembran von KEF und Audax waren damals eine Sensation. Diese Lautsprecher hatten aber eine ausgeprägte (und deutlich hörbare) Resonanz bei rund 1.5 kHz. Bextren wird heute als Membranmaterial nicht mehr verwendet und ist deshalb nur von historischem Interesse.

Prominentes Beispiel: KEF B110

Polypropylen

Entwickelt von der BBC im Jahre 1977 als Ersatz für Bextren. Es handelt sich um ein Material mit hoher innerer Dämpfung. Aus diesem Material gefertigte Membranen haben keine ausgeprägte durch Teilschwingungen verursachte Resonanzspitzen.

typische Eigenheiten:

- flacher Frequenzgang ohne ausgeprägte Ueberhöhungen
- gute Impulswiedergabe
- geringe Klangverfärbungen
- wegen ausgeglichenem Frequenzgang und Breitbandigkeit keine grosse Anforderungen an die Frequenzweiche.
- Klangtransparenz nahezu wie Papiermembran

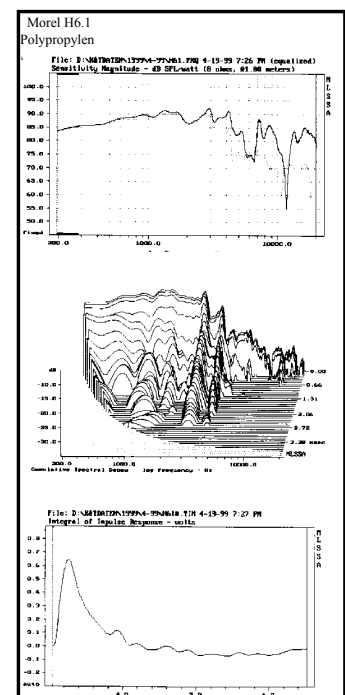


Bild 38

mögliche Probleme:

- Klang weniger transparent als Lautsprecher mit Metall-, Glassfaser-, Kevlar-Membran.
- schlechte "Klangverträglichkeit" mit metal dome-Hochtönern.

Aluminium, Magnesium (Bild rechts)

Kleiner Wirkungsgrad und hoher Preis sind typisch für Lautsprecher mit Aluminiummembranen, bei denen wegen der fehlenden inneren Dämpfung deutliche Teilschwingungen auftreten. Dies mit der Folge von ausgeprägten Resonanzspitzen im Frequenzgang.

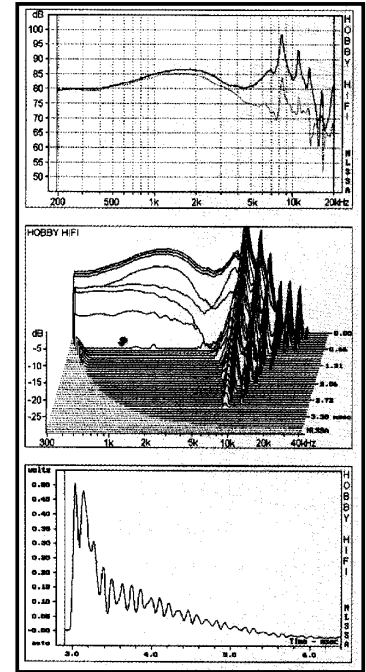


Bild 39

Hartschaumstoff (ohne Abbildung)

In den Siebzigerjahren spielte dieses Material eine gewisse Rolle, vor allem dank dem Tieftöner B139 von KEF. Heute gibt es praktisch keine Lautsprecher mit Schaumstoffmembranen mehr.

typische Eigenheiten:

- praktisch keine Teilschwingungsneigung im Tiefton- und unteren Mitteltonbereich.

mögliche Probleme:

- geringer Wirkungsgrad
- geringe Belastbarkeit
- überstark ausgeprägte Resonanzen im oberen Mitteltonbereich.

Kohlefaser

Wegen seiner geringen Masse und der grossen mechanischen Festigkeit handelt es sich um ein geeignetes Membranmaterial. Die Herstellung von Membranen aus Kohlefasern ist aber nicht unproblematisch. Aus diesem Grund, und auch wegen dem relativ hohen Preis, hat sich dieses Membranmaterial aber nicht breit durchgesetzt.

typische Eigenheiten:

- nur geringe Teilschwingungsneigung im Tiefton- und unteren Mitteltonbereich.
- nahezu ideale, unverfälschte Wiedergabe des Tiefton- und unteren Mitteltonbereichs.
- hoher Wirkungsgrad

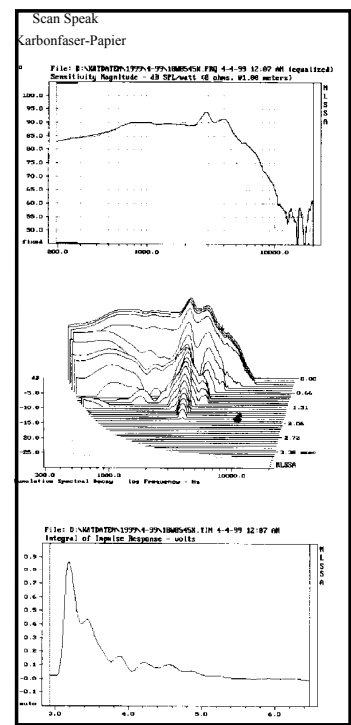
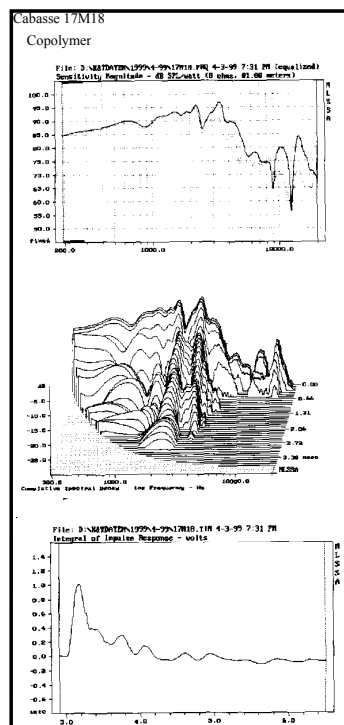


Bild 40, 41

mögliche Probleme:

- unkontrollierbare Teilschwingungen am oberen Bereichsende erfordern aufwendige Frequenzweichen mit steilen Filtern und Saugkreisen.

Kevlar

Dieses Membranmaterial wurde erstmals von Eton und Focal Mitte der Achtzigerjahre verwendet.

Dieses Material ist nur bei sogenannten Honeycomb-Membranen zu verwenden, einer Sandwichkonstruktion mit bienenwabeförmigem Kern. Oder dann mit einem Acrylträger, der mit Kohlefasern durchsetzt ist.

mögliche Eigenheiten:

- sehr linearer Frequenzgang mit (im besten Fall) regelmässigem, und nicht sehr steilen Abfall des Frequenzgangs am oberen Ende des Abstrahlbereichs.

mögliche Probleme:

- aufwendige (und damit teure) Herstellung
- in bisher jeder Realisierung Resonanzspitzen am oberen Bereichsende, die bei den meisten Chassis stark ausgeprägt sind und aufwendige Frequenzweichen mit Saugkreisen erfordern.

2.2.4 andere Lösungen für Abstrahlflächen und deren Antrieb

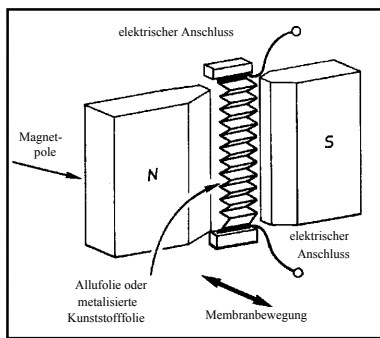


Bild 42 Bändchenlautsprecher

Bild 43 Orthophase-Lautsprecher (Blatthaller-Prinzip)

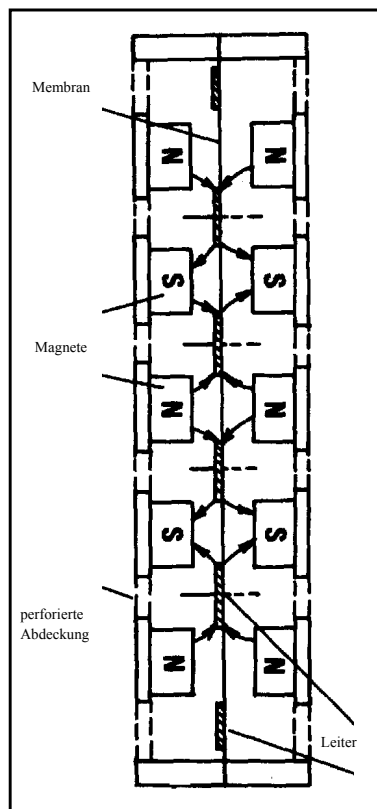


Bild 44 Flächenstrahler mit Leiterbahnen auf der Membran

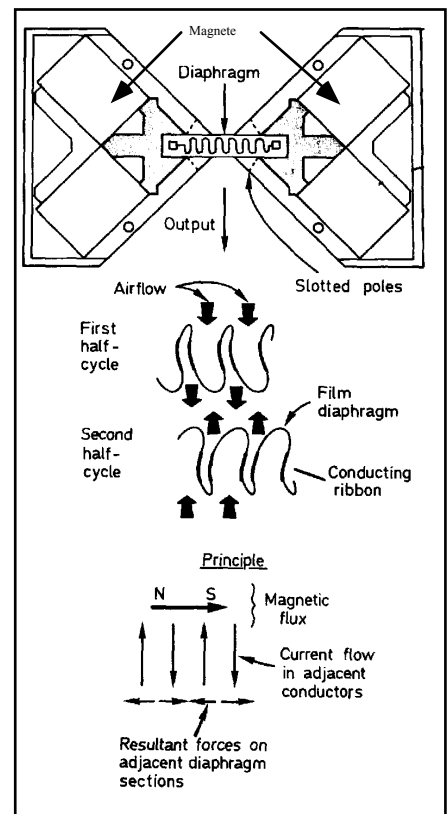


Bild 45 air motion transformer (Heil)

2.3 Magneteinheit

2.3.1 Magnet

Die Eigenschaften eines Magnetfeldes werden mit den Begriffen Feldstärke, Induktion und magnetischer Gesamtfluss beschrieben. Die magnetische Feldstärke H im Luftspalt eines Lautsprechers hängt vom Permanentmagneten und von der Luftspaltbreite ab:

- je breiter der Luftspalt, desto kleiner die Feldstärke.

Der Luftspalt muß aber eine gewisse Breite haben, weil sonst die Anforderungen an die Führung der Schwingspule zu groß werden.

Die magnetische Induktion B (auch Flußdichte genannt) gibt die Dichte des magnetischen Flusses im Luftspalt an. Die Induktion ist um so kleiner, je tiefer der Luftspalt ist.

Das Produkt von Induktion und Luftspalttiefe ergibt schließlich den magnetischen Fluß. Die magnetischen Eigenschaften eines Lautsprechers sind um so besser, je größer Induktion und Fluß sind.

Tabelle : gebräuchlichen Magneteinheiten

CGS-System	
Feldstärke H	Oersted ($\text{cm}^{-1/291/25-1}$)
Induktion B	Gauss ($\text{cm}^{-1/291/25-1}$)
magnetischer Fluss	Maxwell ($\text{cm}^3/291/25-1$)

MKS-System	
Feldstärke H	A/m
Induktion B	VS/m
Magnetischer Fluss	VS (Weber)2

Die Einheiten von Oersted (Oe) und Gauß (G) entsprechen sich. Zwei verschiedene Bezeichnungen wurden nur eingeführt, um zwischen magnetischer Feldstärke in Luft und magnetischer Induktion in einem Magnetmaterial zu unterscheiden.

Die magnetischen Eigenschaften eines Materials lassen sich aus seiner Hysteresiskurve ablesen. In diesem Zusammenhang interessiert nur der Kurvenverlauf im zweiten Quadranten, die „Demagnetisierungskurve“

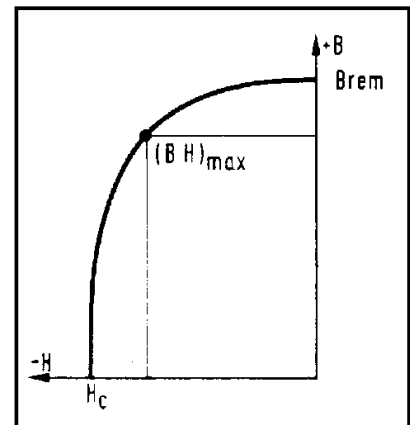


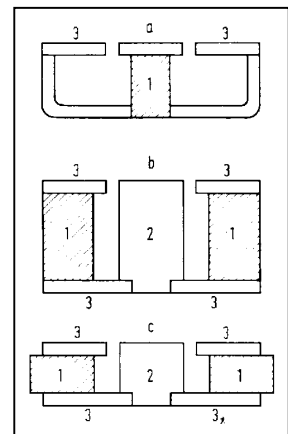
Bild 46

Das Produkt BH wird magnetische Energiedichte eines Magnetmaterials genannt. Um eine bestimmte Feldstärke im Luftspalt mit einem möglichst kleinen Magneten zu erzeugen, muß die Energiedichte des Magneten möglichst groß sein. Deshalb wird als Arbeitspunkt der Punkt auf der Demagnetisierungskurve gewählt, für den das Produkt BH den größtmöglichen Wert hat. Dies ist im Punkt P in Bild der Fall. Die Größe des maximalen $B \cdot H$ -Wertes hängt vom Magnetmaterial ab.

Tabelle : B•H-Werte von Magnetmaterialien

Magnet	$B \cdot H$ -Wert (Mega-Gauss•Oersted)
Alni	1.25
Alnico	1.7
Ticonal	5.0
Alcomax	5.75

Bild 47



Magneteinheiten in Lautsprechern können als Topf-, Bügel- oder Ringmagnet ausgeführt sein. Diese verschiedenen Formen sind in Bild 34 zu sehen. In diesem Bild bedeuten (1) den Magneten, (2) den Polkern und (3) die Polschuhe. Der Bügelmagnet (Bild 34 a) wird oft

in Lautsprechern der Mittelklasse verwendet. In hochwertigen Systemen findet man meistens Ringmagneten (Bild 34 b), mit denen sich höhere Feldstärken erzielen lassen. Hohe Feldstärken bei kleinem Volumen und Gewicht lassen sich mit keramischen Magneten erzeugen (Bild 34 c).

Zusätzliche Anforderungen werden an den Magneten eines Lautsprechers in einem Fernsehgerät gestellt:

- Um die Elektronenbahnen in der Bildröhre nicht zu beeinflussen, darf das äußere Streufeld nicht zu groß sein. Das kann mit einer Abschirmung und zusätzlichen Kompensationsmagneten erreicht werden [14].

B•I-Wert eines Lautsprechers

Vom B•I-Wert eines Lautsprechers, dem „Kraftfaktor“, hängt der Wirkungsgrad und die Bewegungsdämpfung der Schwingspule durch den Innenwiderstand eines Leistungsverstärkers ab (B ist die Induktion, I die Leiterlänge der Schwingspule)

Magnetische Feldstärke und Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit und Betriebsleistung eines Lautsprechers hängt stark von der Feldstärke des Magneten ab. In Tabelle 8 ist die Empfindlichkeit bei verschiedenen Feldstärken aufgeführt. Bezugspunkt ist eine Feldstärke von 8000 Oe.

Die Empfindlichkeit bei dieser Feldstärke wird gleich 0dB gesetzt. Ferner ist angenommen, daß man für eine bestimmte Schalleistung eine Verstärkerleistung von 10 Watt benötigt, wenn die magnetische Feldstärke 8000 Oe beträgt. Die bei anderen Feldstärken für die gleiche Schalleistung benötigte Verstärkerleistung ist in der dritten Spalte der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle : Feldstärke und Empfindlichkeit

Feldstärke (Oe)	Empfindlichkeit(dB)	Verstärkerleistung (Watt)
8 000	0	10
10 000	1.5	7
12 000	3	5
15 000	4.2	3.8
17 000	5	3.15

2.4 Schwingspule

Eine Schwingspule sollte den folgenden Anforderungen genügen:

- Da die antreibende Kraft proportional der Leiterlänge der Schwingspulenwicklung ist, muß diese möglichst groß sein.
- Um Verluste zu vermeiden, darf der ohmsche Widerstand der Wicklung nicht zu groß sein. Das setzt die Verwendung von möglichst dickem Draht voraus.
- Die Schwingspule muß möglichst leicht sein, da sie Bestandteil des schwingenden Systems ist.
- Die Schwingspule muß möglichst dünnwandig sein, da sonst der Luftspalt zu breit wird. Diese Forderungen widersprechen sich zum Teil. Deshalb muß eine Kompromißlösung gesucht werden.

Impedanz der Schwingspule

Für die Impedanz Z, der Schwingspule gilt:

$$Z_s = (R_s^2 + (\omega \cdot L)^2)$$

Zs Impedanz, Rs ohmscher Widerstand

Ls Induktivität der Schwingspule.

Diese Gleichung gilt nur für Frequenzen, die genügend über oder unter f_0 liegen.

Unter 1000 Hz überwiegt R_s , während mit zunehmender Frequenz der Einfluß von L_s immer mehr zunimmt. Die Anpassungsimpedanz eines Lautsprechers wird deshalb für eine Frequenz von 400 Hz, 800 Hz oder 1000 Hz angegeben. Sie entspricht dann praktisch dem ohmschen Widerstand R_s .

Uebliche Werte der Anpassungsimpedanz liegen zwischen 20 Ohm und 16 Ohm. Für besondere Anwendungen (traflose Röhren-Endstufen) wurden früher auch Lautsprecher mit Anpassungsimpedanzen von 400 Ohm und 800 Ohm hergestellt.

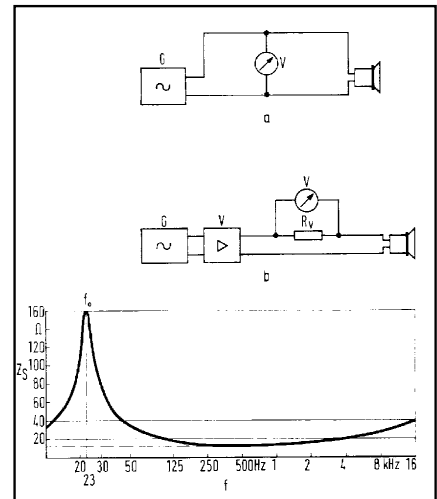


Bild 48

Im Bereich der Eigenfrequenz eines Lautsprechers sind, abhängig von der Dämpfung, große Membranauslenkungen möglich. Die dann in der Schwingspule entstehende Gegen-EMK wirkt sich als Vergrößerung der Impedanz aus. Die Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz kann mit einer Schaltung nach Bild 35 a ermittelt werden, wenn ein Tongenerator mit einem Innenwiderstand von rund 600 Ohm und ein NF-Voltmeter zur Verfügung stehen: Der im Vergleich zur Schwingspulenimpedanz hochohmige Tongenerator schickt einen Strom frequenzunabhängiger Größe durch die Schwingspule. Die Spannung an den Lautsprecherklemmen ist dann ein Maß für die Impedanz der Schwingspule.

Bild 48 (oben) zeigt eine Messschaltung mit konstanter Spannung an den Lautsprecherklemmen:

Der Spannungsabfall an R_v ist ein Maß für den Schwingspulenstrom und damit für die Impedanz der Schwingspule. Wenn der Widerstand R_v kleiner als 1 Ohm ist, entspricht diese Messung den Bedingungen beim normalen Betrieb.

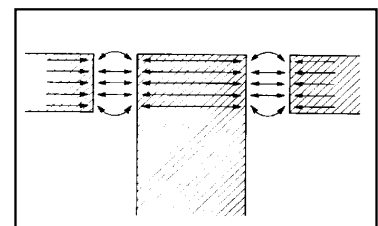
Der typische Impedanzverlauf einer mechanisch blockierten (punktiert gezeichnet) wird ausschliesslich von der Induktivität bestimmt (mit der Frequenz zunehmend). Die frequenzabhängigen Abweichungen der Impedanz vom Anpassungswert bei den hohen Frequenzen und bei f_0 wirken sich in der Praxis ungünstig aus, da die aufgenommene Leistung bei Fehlanpassung abnimmt. Jede Maßnahme, die den Impedanzverlauf eines Lautsprechers verbessert, verbessert deshalb auch den Frequenzgang. Wickelt man zum Beispiel die Schwingspule statt auf einen Papierträger auf einen Wickelkörper aus Aluminium, der einen Kurzschlußring darstellt, so ist der Impedanzanstieg nach hohen Frequenzen hin geringer. Eine ähnliche Wirkung hat ein verkupfertes Polkern. Durch solche Maßnahmen ist bei 15 000 Hz eine Reduktion der Impedanz um 60% möglich. Die Überhöhung bei f_0 kann nur durch Dämpfen der Membranbewegung verkleinert werden. Das ist durch zusätzliche Strahlungsdämpfung durch eine geeignete Schallführung und durch elektrische Dämpfung der Schwingspule (starkes Magnetfeld und geringer Innenwiderstand des Verstärkers) möglich.

Bild 49

Homogenität des Magnetfeldes

Solange sich die Schwingspule nicht aus dem homogenen Magnetfeld im Luftspalt herausbewegt, ist die Auslenkung genau proportional dem Schwingspulenstrom. Das magnetische Feld ist aber nur im mittleren Teil der Luftspalttiefe homogen.

Zu den Rändern hin geht es in das äußere Streufeld über (Bild 56). Die Schwingspule sollte bei ihrer Bewegung immer die gleiche Anzahl von Feldlinien schneiden. Deshalb muß sie länger sein, als der Luftspalt tief ist, da sie dann immer im Gesamtfeld schwingt.



Vom Verhältnis von Schwingspulenlänge zu Luftspalttiefe hängt die maximale lineare Auslenkung ab, wenn diese nicht auch von der Membraneinspannung begrenzt wird. Bei einem hochwertigen Tieftonlautsprecher sollte die größte lineare Auslenkung mindestens 3 mm betragen.

Treten bei einem Lautsprecher mit Sicherheit keine großen Auslenkungen auf, so ist die Schwingspule oft auch kürzer, als der Luftspalt tief ist. Wenn die Schwingspule bei ihrer Bewegung innerhalb von 10% der Luftspalttiefe bleibt, schneidet sie immer die gleiche Anzahl Feldlinien. Derartige Schwingspulen finden sich manchmal in Mittelton- und Hochtonlautsprechern.

Je nach Lautsprechergröße können Schwingspulen einen Durchmesser von 1.3 cm bis 10 cm haben.

2.5 Korb

Der Korb als Chassis für den schweren Magneten und die Membran muß mechanisch sehr stabil sein. Der Korb darf die Membranrückseite nicht wie eine Haube abschließen, da sonst das Luftpolster zwischen Membran und Korb die Membranbewegung beeinflusst. Körbe werden meistens aus gepreßtem Stahlblech oder aus Aluminiumguß hergestellt.

Aluminiumguß ist vorzuziehen, da die Stabilität größer ist und die relativ kleinen Verstrebungsrippen das Schallfeld wenig beeinflussen. Oft haben die Verstrebungsrippen eine strömungstechnisch günstige Form.

Körbe aus Stahlblech sind nicht so stabil wie Gußkörbe. Stahlblechkörbe haben meistens die Form einer Haube, die mit Löchern versehen ist. Das Schallfeld wird stärker als bei einem Gußkorb beeinflusst.

Kleine und billige Lautsprecher haben üblicherweise Körbe aus Stahlblech, hochwertige Systeme mit schweren Magneten und großem Durchmesser meistens Gußkörbe.

2.6 Spezielle dynamische Lautsprecher

Axiom 80 von Goodmanns

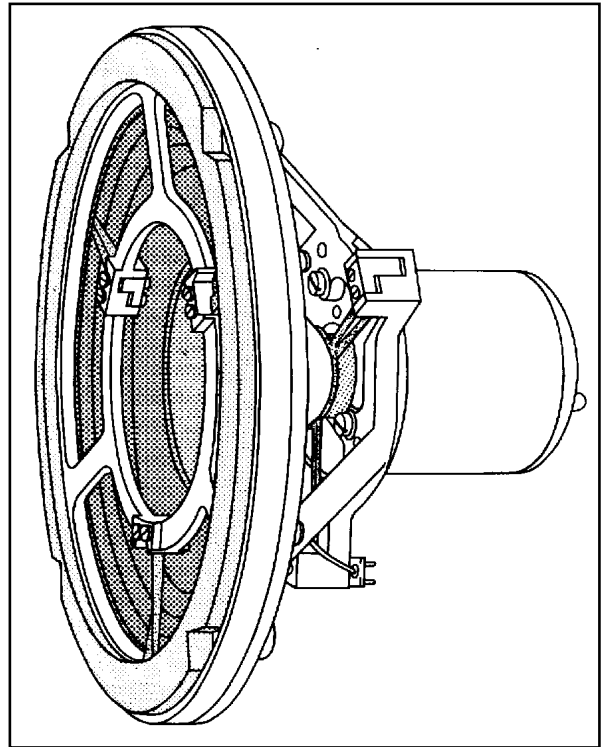
Klassischer, hochwertiger Lautsprecher der Fünfzigerjahre mit einem Konusdurchmesser von 20cm, Papiergussmembran mit Verstärkungsringen und aufgesetztem Hochtonkonus.

Schwere Magneteinheit und optimal-offener Korb aus Aluguss.

Der Konus ist am äusseren Rand und an der Schwingspule mit vorgespannten Blattfedern aus Hartpapier aufgehängt.

Die Resonanzfrequenz liegt bei 20Hz.

Bild 50



Coaxial-Lautsprecher von Tannoy

Diesen klassischen Zweiweglautsprecher gibt es seit den Fünfzigerjahren in verschiedenen Grössen (8" bis 15")

Im Bild 38 sind

(1) staubdichter, akustisch durchlässiger Abschluss der Einheit Schwingspule - Luftspalt des Magneten

(2) magnetischer Kurzschlussring

(3) Luftpolster

(4) Kanülensystem zur Phasenkompensation des Hochtontreibers

(5) Hochtonmembran

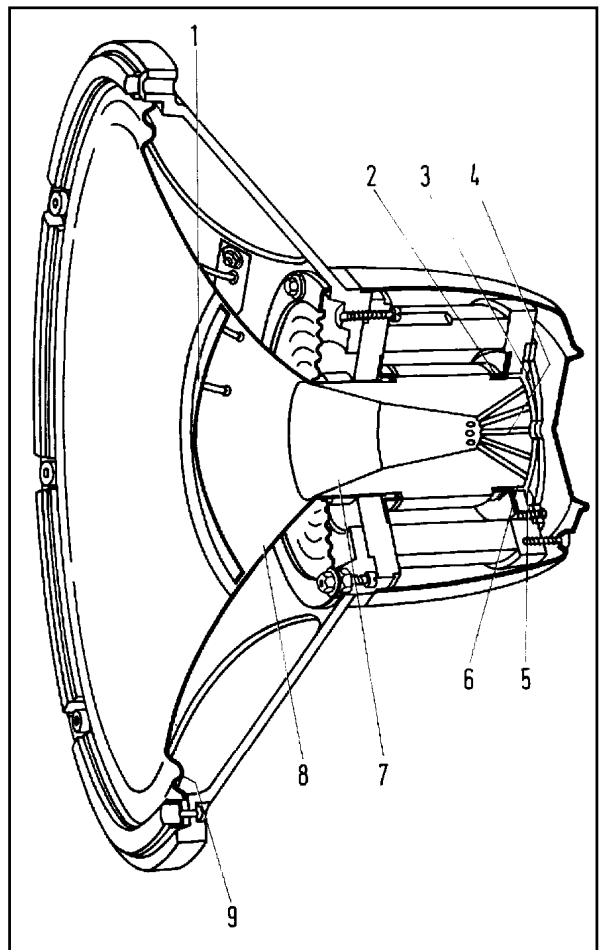
(6) Spulenträger aus Aluminium

(7) Hochtonhorn, dessen Verlängerung durch die Tieftonmembran gebildet wird

(8) Tiefton-Membran

(9) äussere Membranaufhängung

Bild 51



3. Schallführungen

3.1 der akustische Kurzschluss

Dynamische Lautsprecher sind für eine wirkungsvolle Tieftonwiedergabe zu klein.

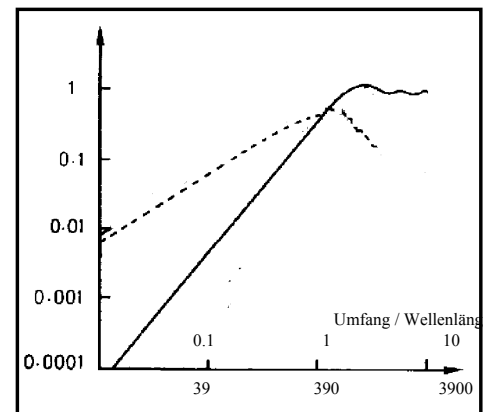
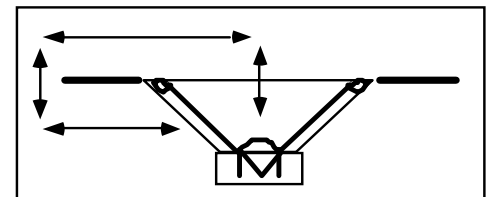
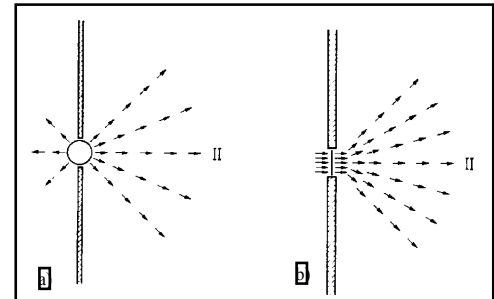
Die Folgen:

- Der Lautsprecher arbeitet im Bereich des mit der Frequenz ansteigenden Strahlungswiderstandes. Der Strahlungswiderstand hat also nicht den maximal-möglichen Wert (Bild 39 a zeigt die Situation für einen 12"- Tieftonlautsprecher). Der Wirkungsgrad der Schallabstrahlung im Tieftonbereich ist also schlecht
- Es tritt ein sogenannter akustischer Kurzschluss auf mit der Folge eines 6dB/Oktav-Abfalls unterhalb der Frequenz, bei der Laufweg des Schalls um den Membranrand herum kleiner ist als die Wellenlänge. In diesem Fall wird also zunehmend (mit kleiner werdender Frequenz) nur ein Luftvolumen um den Rand des Lautsprechers herum verschoben.

Eine wirksame Tieftonwiedergabe mit einem zu kleinen Lautsprechern ist nur möglich, wenn der Lautsprecher mit einer Schallführung kombiniert wird. Diese Schallführung hat die Aufgabe,

- den akustischen Kurzschluss zu verhindern,
- die Bewegung der akustisch unbelasteten Abstrahlfläche zu kontrollieren.

Bild 52, 53, 54



Möglichkeiten für Schallführungen

Schallwände,
offene Gehäuse,
geschlossene Gehäuse,
Bassreflex-Gehäuse,
akustisches Labyrinth,
transmission line-Gehäuse,
Hörner

3.2 geschlossene Gehäuse

Wenn ein Lautsprecher in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut wird, sind die beiden Membranseiten akustisch vollständig getrennt. Es handelt sich um die einfachste Möglichkeit einer praktikablen Schallführung, bei der nur die Eigenheiten des Lautsprechers und das Luftvolumen des Gehäuses eine Rolle spielen.

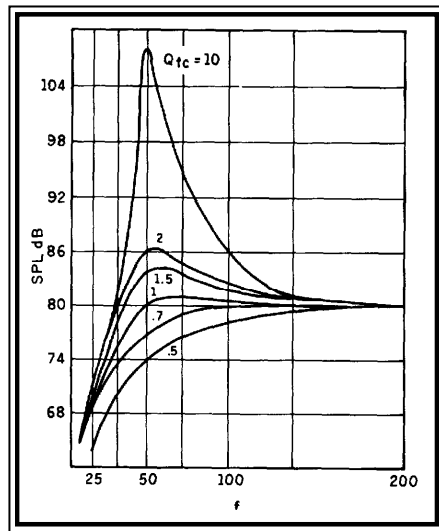
Bild 55

Geschlossenen Boxen können folgendermassen realisiert werden:

- als unendliche Schallwand (infinite baffle),
- als System mit pneumatischer Aufhängung (air suspension)

Gehäuse, die wie eine unendlich grosse Schallwand funktionieren, sind so gross, dass die durch die Membranbewegung bewirkte Kompression der Luft im Gehäuse vernachlässigbar ist. Diese Schallführung ist nur noch von historischem Interesse.

Von acoustic suspension spricht man, wenn die Rückstellkraft des Luftpolsters im Gehäuse um mindestens den Faktor 3 grösser ist als die der elastischen Aufhängung der Lautsprechermembran. Die Kombination Lautsprecher - Gehäuse entspricht dann einem Hochpass zweiter Ordnung, dessen Eigenschaften (Resonanzfrequenz, Dämpfung und untere Grenzfrequenz) sich einfach berechnen und (was auf dem Audiogebiet nicht immer der Fall ist) auch nahezu ideal realisieren lassen. Massgebend ist der Q-Wert der Box (Bild 40). Die in diesem Bild gezeigten Frequenzgänge lassen sich für einen bestimmten Lautsprecher ausschliesslich durch Variation der Gehäusegrösse realisieren.



3.2.1 Theoretische Betrachtung

Eine geschlossene Box nach dem acoustic suspension-Prinzip wird berechnet wie ein "elektrischer" Hochpass zweiter Ordnung. Ausgangspunkt ist das Ersatzschaltbild der Box (Bild 41).

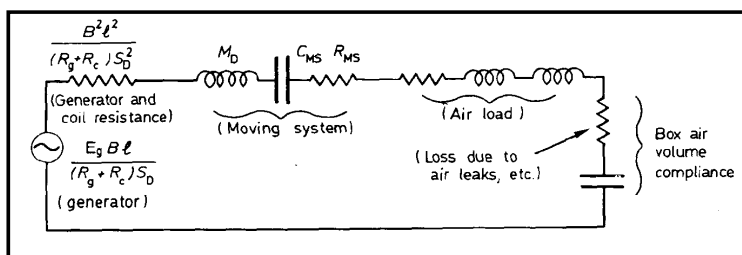
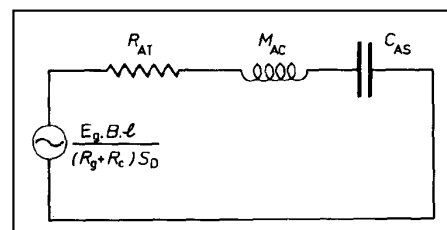


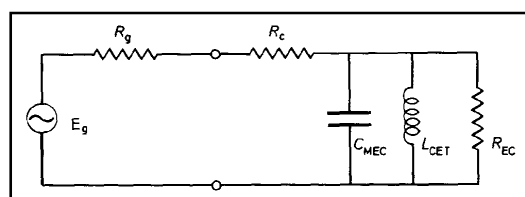
Bild 56 Ersatzschaltbild der geschlossenen Box

Rat: Summe aller Widerstände,
 MAC: total-bewegte Masse (Membran- und Schwingspulmasse, sowie mitbewegten Luftmasse (Imaginäranteil der Strahlungsimpedanz)).
 Cas: Summe der Steifigkeit der Membraneinspannung und des Luftpolsters im Gehäuse.

Bild 57 vereinfachtes Ersatzschaltbild



Da der Strahlungswiderstand wegen der kleinen Abstrahlfläche sehr klein ist, kann er bei der Berechnung der Box vernachlässigt werden. Das gleiche gilt für die "Widerstandsverluste" des Gehäuses (verursacht durch undichtes Gehäuse). Die Berechnung kann auf der Basis des vereinfachten Ersatzschaltbildes (Bild 57) geschehen.



Diese zwei Ersatzschaltbilder enthalten elektrische, und mechanische Komponenten. Dem vereinfachten Ersatzschaltbild entspricht das elektrische Ersatzschaltbild, das als Ausgangspunkt für die folgenden Berechnungen genommen wird.

In den Bildern entsprechen sich MAC und CMEC sowie CAT und LCET. REC repräsentiert die mechanischen Verluste.

Da der Strahlungswiderstand wegen der kleinen Abstrahlfläche sehr klein ist, kann er bei der Berechnung der Box vernachlässigt werden. Das gleiche gilt für die "Widerstandsverluste" des Gehäuses (verursacht durch undichtes Gehäuse). Die Berechnung kann deshalb auf der Basis des vereinfachten Ersatzschaltbildes geschehen. Bei Rat handelt es sich um die Summe aller Widerstände, MAC ist die total-bewegte Masse, die sich aus der Membran- und Schwingpulsmasse, sowie der mitbewegten Luftmasse (Imaginäranteil der Strahlungsimpedanz)) zusammensetzt. Cas repräsentiert die Summe der Steifigkeit der Membraneinspannung und des Luftpolsters im Gehäuse.

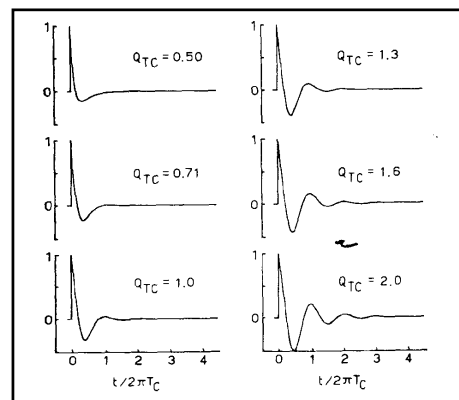
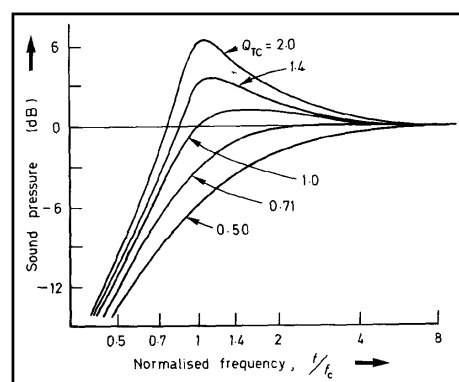
3.2.2 Uebertragungseigenschaften

Bild 59 zeigt die realisierbaren Frequenzgänge von geschlossenen Boxen, und Bild 60 die zugehörigen Sprungantworten

Aus diesen zwei Bildern wird folgendes ersichtlich:

- $Q_{TC} = 0.5$, kritische Dämpfung, keine Ueberhöhung, aber der -3dB-Punkt liegt eine Oktave über der Resonanzfrequenz. Die Sprungantwort ist ideal.
- $Q_{TC} = 1/\sqrt{3} = 0.577$, Bessel (max flat delay) entspricht praktisch der kritischen Dämpfung
- $Q_{TC} = 1/\sqrt{2} = 0.707$, Butterworth-Funktion (B2) Optimaler Frequenzgang, gute Sprungantwort
- $Q_{TC} > 1/\sqrt{2}$, Chebychev-Funktion (C2) Ueberhöhung bei, und Welligkeit oberhalb der Resonanzfrequenz. Sprungantwort nicht ideal

Bild 59, 60



Klangeigenheiten der verschiedenen Q-Werte

Abstimmungen mit Q-Werten in der Gegend von $Q_{TC} = 1$ haben subjektiv einen warmen und robusten Klang zur Folge.

- Bei Q-Werten um $Q_{TC} = 0,8$ hat man den Eindruck eines klareren und aufgelösteren Klangbildes.
- Q-Werte von $Q_{TC} = 0,5$ klingen (trotz der theoretischen Ueberlegenheit) flau, dünn und überdämpft.

In der Praxis werden die Q-Werte auf die jeweilige Gehäusegröße und die jeweilige untere Grenzfrequenz abgestimmt. So hat zum Beispiel die kleine Monitorbox LS3/5A der britischen Firma Rogers mit einem Inhalt von 7.5 Litern einen relativ hohen Q-Wert von $Q_{TC} = 1.2$. Sie gilt allgemein als bestklingende Kleinbox.

Für die üblichen geschlossenen Boxen gilt allgemein akzeptiert im Bezug auf den Q-Wert folgendes:

- Bei einer unteren Grenzfrequenz von weniger als 50Hz und einem Gehäusevolumen von mehr als 30 Litern werden Q-Werte bis $Q_{TC} = 1.1$ realisiert. Derartige Boxen werden bei der Wiedergabe von Orgel- und Orchestermusik als gut beurteilt.
- Boxen mit weniger als 30 Litern Inhalt und einer oberhalb von 50Hz liegenden Grenzfrequenz, sowie Q-Werten zwischen 1.2 und 2 eignen sich wegen des subjektiv stärkeren Tieftonbereichs für die Wiedergabe von Pop- und elektronischer Musik.

3.2.3 Berechnung von geschlossenen Boxen

Parameter

Es handelt sich um alle Parameter, die im Zusammenhang mit der Berechnung einer geschlossenen Box eine Rolle spielen. Die Bezeichnung der Parameter entspricht der stillschweigenden, internationalen Übereinkunft.

Liste der Parameter

B	magnetischer Fluss im Luftspalt
c	Schallgeschwindigkeit (= 345m/s)
Cab	Elastizität des Luftpolsters im Gehäuse
Cas	akustische Nachgiebigkeit der Membraneinspannung
Cab	el. Kapazität, repräsentiert die bewegte Masse
eg	Ausgangsspannung des Verstärkers
f	Frequenz
fc	Resonanzfrequenz der geschlossenen Box
fct	Resonanzfrequenz des Lautsprechers im Testgehäuse
fs	Resonanzfrequenz des Lautsprechers
G(s)	Übertragungsfunktion
kx	Auslenkungskonstante
kp	Leistungskonstante
kn	Wirkungsgradkonstante
l	Länge der Schwingspulenwicklung
Lcet	Induktivität, repräsentiert totale Elastizität
Mac	akustische Masse (Membran + Luftmasse)
Cat	Elastizität von Gehäuse und Lautsprecher des Lautsprechers im Gehäuse
Mas	akustische Masse von Membran und mitschwingender Luftmasse
Par	akustische Leistung bei maximaler Membranauslenkung
Per	elektrische Leistung bei max. Membranauslenkung
Pe(max)	von max. Schwingspulentemperatur bestimmte elektrische Leistung
Q	Güte, Verhältnis von Reaktanz zu Widerstand (Serienschaltung), oder Widerstand zu Reaktanz (Parallelschaltung)
Qec	Q bei fc (nur Widerstand Rb berücksichtigt)
Qes	Q des Lautsprechers (nur Rg berücksichtigt)
Qmc	Q der Box bei fc, nur nichtelektrische Widerstände
Qms	Q Lautsprecher, nur nichtelektrische Widerstände
Qtc	Q-Wert der Einheit Gehäuse-Lautsprecher
Qtco	Wert von Qtc mit Rg = 0
Qts	Q-Wert des Lautsprechers bei fs
Rab	akustischer Widerstand der Gehäuseverluste (verursacht durch interne Absorption)
Ras	akustischer Widerstand der Membranaufhängung
Re	Widerstand der Schwingspule
Res	el. Widerstand (repräsentiert durch Membranaufhängung verursachte Verluste)
Rg	Innenwiderstand des Verstärkers
s	komplexe Frequenz
Sd	akustisch wirksame Membranfläche
T	Zeitkonstante (= 1/2pf)
Uo	Schnelle des Ausgangsvolumens (ganzes System)
Vab	Ersatzvolumen für Elastizität des Luftpolsters im Gehäuse

V_{as}	Ersatzvolumen (Luftvolumen mit der gleichen Rückstellkraft wie die der Membraneinspannung)
V_{at}	Elastizität des ganzen Systems (als Luftvolumen)
V_b	Nettovolumen des Gehäuses
V_d	maximal-mögliches Luftverschiebungsvolumen
X_{max}	maximale lineare Auslenkung der Membran
$X(s)$	Funktion der Membranauslenkung
$Z_{vc}(s)$	Funktion der Schwingspulenimpedanz
a	Elastizitätsverhältnis
n_0	Referenz-Wirkungsgrad
ρ_0	Dichte der Luft (= 1.18 kg/m ³)
ω	Kreisfrequenz (= $2\pi f$)

Zusammenhang Gehäuse- Lautsprecher- und Box-Eigenheiten

Voraussetzung:

- der Innenwiderstand des Verstärkers ist 0 (praktisch: mindestens 10 x kleiner als der Lautsprecherwiderstand)
- die bewegte Masse dem eines auf einer Schallwand montierten Lautsprechers,
- der überwiegende Anteil der Dämpfung der Box wird vom elektromagnetischen System (Schwingspule - Magneteinheit) und den mechanischen Verlusten des Lautsprechers bestimmt.
- das Gehäuse ist ungedämpft, also nicht mit schallabsorbierendem Material gefüllt.

In diesem Fall gelten folgende Beziehungen:

$$Q_{tco}/Q_{ts} = Q_{ec}/Q_{es} = f_c/f_s = \sqrt{a + 1} \quad (25)$$

daraus folgend

$$f_c/Q_{tco} = f_s/Q_{ts} \quad \text{und} \quad Q_{ts} = (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \quad (26,27)$$

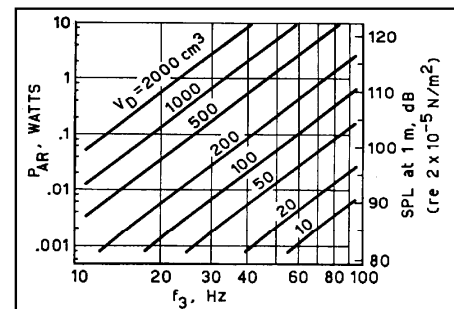
$$\text{mit } a = V_{as}/V_b \quad (28)$$

a: Elastizitätsverhältnis der Membraneinspannung zur Elastizität des Luftpolsters in der Box

Die gegenseitigen Abhängigkeiten der Lautsprecher- und Box-Eigenheiten sind in den folgenden Bildern dargestellt.

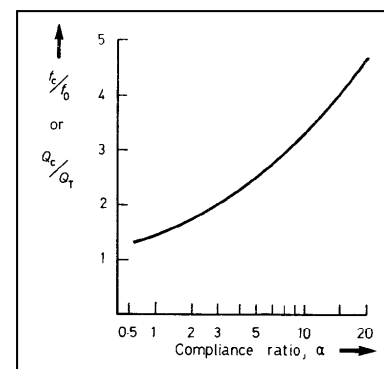
- Verhältnis der akustischen Leistung zur unteren Grenzfrequenz, zum Verschiebungsvolumen, und zum Schalldruck

Bild 61



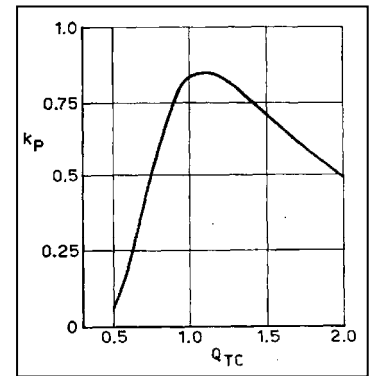
- Zusammenhang der Resonanzfrequenzen und der Q-Werte des Lautsprechers und der Box mit a als Verknüpfungsfunktion

Bild 62



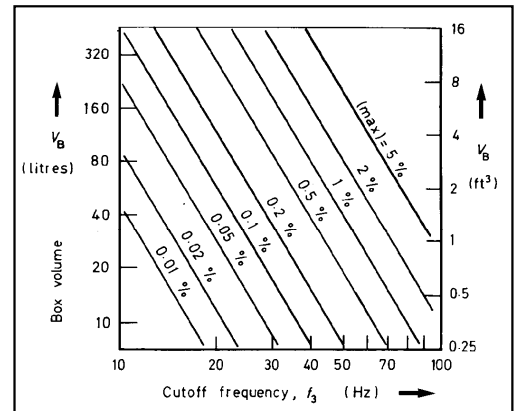
- Bild 71 Faktor k_n in Abhängigkeit vom Q-Wert der Box (k_n : Wirkungsgradkonstante)

Bild 63



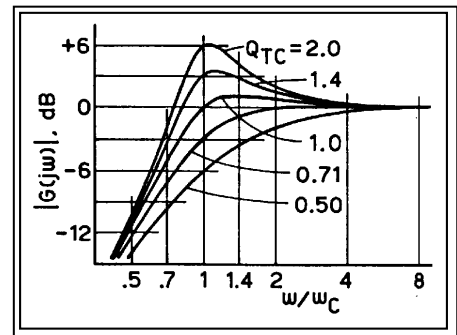
- Bild 72 Zusammenhang von Wirkungsgrad, unterer Grenzfrequenz und Gehäusevolumen

Bild 64



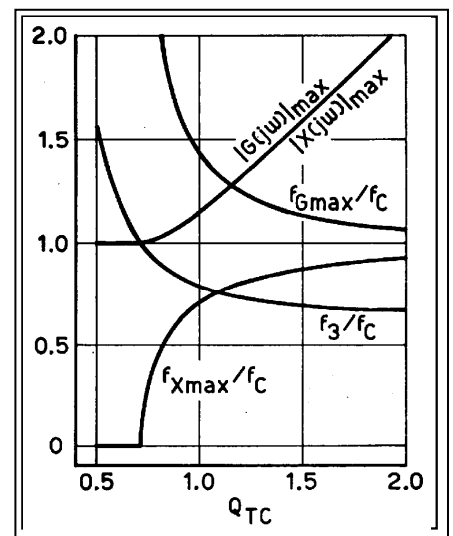
- Bild 73 Uebertragungsfunktion des Amplitudenfrequenzgangs für verschiedene Q-Werte

Bild 65



- Bild 74 Grenzfrequenz, Frequenzgang und Frequenzabhängigkeit der Membranauslenkung in Abhängigkeit vom Q-Wert der Box

Bild 66



4.3.3 Zusammenfassung

- Die Gesetzmässigkeiten der acoustic suspension gelten nur, wenn das Elastizitätsverhältnis a Werte zwischen 2 und 10 hat
- 2. Bei acoustic suspension-Boxen bestimmt der Q-Wert Q_{TC} der Box den Verlauf des Frequenzgangs im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter den Verlauf des Frequenzgangs.
- 3. Die Eigenschaften der Box in Kombination mit einem bestimmten Lautsprecher werden ausschliesslich vom Volumen V_c des Gehäuses bestimmt.
- 4. Der Q-Wert der Box und die untere Grenzfrequenz f_3 hängen voneinander ab: Je grösser der Q-Wert, desto tiefer liegt f_3 .

- 5. Die maximale akustische Leistung P_{ar} und die untere Grenzfrequenz f_3 hängen voneinander ab: Je tiefer f_3 , desto kleiner die maximal-mögliche akustische Leistung. Für die akustische Leistung ist letztlich die Grösse der Abstrahlfläche S_d bestimmend. Oder genauer, das sogenannte "Verschiebevolumen V_d (Membranfläche \cdot Membranauslenkung).
- 6. Die Sprungantwort der Box wird ausschliesslich vom Q-Wert Q_{tco} bestimmt.
- 7. Für geschlossene Boxen mit einem Volumen von mehr als 40 Litern und einer unterhalb von 50 Hz liegenden Resonanzfrequenz werden Q-Werte von $Q_{tco} < 1$ gehörmässig als vorteilhaft empfunden.
- 8. Bei kleineren Gehäusen mit Resonanzfrequenzen von mehr als 50 Hz sind Q-Werte von bis zu $Q_{tco} = 2$ üblich. Der theoretisch optimale Q-Wert von $Q_{tco} = 0.5$ (kritische Dämpfung) wird gehörmässig als überdämpft beurteilt.
- 9. Bei einer für einen bestimmten Lautsprecher konzipierten geschlossenen Box sind Gehäusevolumen, untere Grenzfrequenz, Q-Wert, Wirkungsgrad und maximale akustische Leistung im gewissen Umfang austauschbar. Das Konzipieren einer geschlossenen Box ist deshalb in erster Linie ein Optimierungsproblem, das sich logischerweise mit einem Computerprogramm am einfachsten lösen lässt.
- 9. Wenn die Box mit schallabsorbierendem Material gefüllt wird, führt dies, neben der Dämpfung der Gehäuseresonanzen, zu einer scheinbaren Vergrösserung des Gehäusevolumens und der bewegten Masse des eingebauten Lautsprechers (mehr dazu unter 5.25)

Konzipieren von Boxen für vorgegebene Lautsprecher

Lautsprecher, mit denen man eine geschlossene Box nach dem Prinzip der acoustic suspension mit a-Werten zwischen 3 und 10 realisieren will, müssen folgende Eigenschaften haben:

- Die Resonanzfrequenz des Lautsprechers muss um mindestens eine Oktav tiefer liegen als die der Box.
- Q_{ts} darf höchstens halb so gross sein wie Q_{tco}
- V_b muss um ein Vielfaches grösser sein als die gewünschte Gehäusegrösse.

In diesem Fall gilt:

$$V_b = V_{as}/a \quad \text{und} \quad P_{er} = P_{ar}/\eta_0$$

Berechnungsbeispiel

Lautsprecherparameter:

Resonanzfrequenz $f_s = 19$ Hz, mech. Q-Wert $Q_{ms} = 3.7$, el. Q-Wert $Q_{es} = 0.3$,

Ersatzvolumen $V_{as} = 540$ dm³, el. Leistung $P_e = 25$ W, max Membranauslenkung = 6mm,

Membrandurchmesser = 12 cm

daraus berechnet: $Q_{total} \quad Q_{ts} = 0.32$

Wirkungsgrad $\eta_0 = 1.02\%$

Membranfläche $S_d = 4.5 \cdot 10^{-2}$ m²

Verschiebevolumen $V_d = 2.7 \cdot 10^{-4}$ m³

Für $a = 4$ ergibt sich eine Boxenabstimmung entsprechend einem B2-Filter mit einem Gehäusevolumen von $V_b = 135$ dm³

Die maximal-mögliche Membranauslenkung von 6mm ergibt eine akustische Leistung von

$P_{ar} = 0.19$ akustischen Watt,

die mit einer elektrischen Leistung von $P_{er} = 19$ Watt erzielt wird.

Für $a = 9$ ergibt sich ein Boxenvolumen von 60dm^3 und für $a = 12$ von 40dm^3 . In diesem Fall liegt die Grenzfrequenz höher, und damit auch die akustische Leistung mit $Par = 0.25\text{ Watt}$ (notwendige elektrische Leistung $Per = 25\text{ Watt}$).

In einer Tabelle zusammengestellt sehen die Möglichkeiten dieses Lautsprechers für den Bau einer geschlossenen Box folgendermassen aus:

a	fc(Hz)	Qtc	f3(Hz)	Vab (dm3)
4	42.5	0.72	42	135
6	50.3	0.85	44	90
9	60.0	1.01	47	60
12	68.6	1.15	50	45

Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung

Basis: Q-Wert der Box (Qtc)

$$a = (Q_{tc}/Q_{ts})^2 - 1 \quad (29)$$

$$f_c = (Q_{tc} \cdot f_s)/Q_{ts} \quad (30)$$

$$V_b = V_{as} / a \quad (31)$$

Basis: Volumen der Box (Vb)

$$a = V_{as}/V_b \quad (32)$$

$$Q_{tc} = V((a+1) \cdot Q_{ts}^2) \quad (33)$$

$$f_c = (Q_{tc} \cdot f_s)/Q_{ts} \quad (34)$$

Basis: Resonanzfrequenz der Box (Vb)

$$Q_{tc} = (f_c \cdot Q_{ts})/f_s \quad (35)$$

$$a = (Q_{tc}/Q_{ts})^2 - 1 \quad (36)$$

$$V_b = V_{as}/a \quad (37)$$

untere Grenzfrequenz f3

In der Praxis kann man f_3 (entsprechend dem Q_{tc} der Box) mit genügender Genauigkeit der folgenden Tabelle oder dem Bild 75 entnehmen.

Qtc	Dämpfung	f3 / fs
0.500	kritisch	1.554
0.577	Bessel BL2	1.272
0.707	Butterworth B2	1.000
1.000	Chebyshev	0.786

Wirkungsgrad η_0

$$\eta_0 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot f_3^3 \cdot V_b \quad (38)$$

maximale akustische Leistung Par

$$S_d = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (39)$$

$$V_d = S_d \cdot x_{max} \quad (40)$$

$$Par = 0.85 \cdot f_3^4 \cdot V_d^2 \quad (41)$$

elektrische Leistung Per

$$Per = Par \cdot \eta_0 \quad (42)$$

oder maximaler Wert gemäss Herstellerangaben)

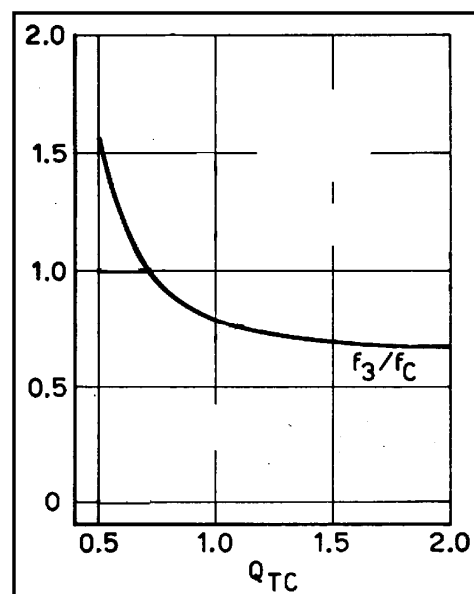


Bild 67

3.2.4 Schallabsorbierendes Material in der Box

Wirkung

Das Gehäuseinnere von geschlossenen Boxen wird immer mit schallabsorbierendem Material bedämpft. Manchmal wird dieses Material nur auf die Gehäuse-Innenwände aufgebracht, manchmal wird aber auch das ganze Gehäuse gefüllt. Nur so lässt es sich vermeiden, dass sich (besonders in kubischen Gehäusen) im mittleren Frequenzbereich stehende Wellen und Gehäuseresonanzen durch die Lautsprechermembran hindurch als Klangverfärbungen bemerkbar machen. Diese zusätzliche Dämpfung findet aber nicht ohne Nebeneffekte statt, die das ganze mechanische System einer acoustic suspension-Box beeinflussen. Dies betrifft die Steifigkeit des Luftpolsters im Gehäuse, die bewegte Masse des Gesamtsystems, sowie die Dämpfung der Membranbewegung.

Erhöhung der Nachgiebigkeit des Luftvolumens

Wenn das Gehäuse mit einem Material niedriger Dichte aber grosser spezifischer Wärme gefüllt wird, ändert sich die Kompressibilität der eingeschlossenen Luft nicht mehr adiabatisch, sondern isothermisch. Dies erhöht die Nachgiebigkeit des Luftpolsters, was einer Vergrösserung des Gehäusevolumens entspricht. Es ist so möglich, das Gehäusevolumen quasi um bis zu 40% zu vergrössern. In der Praxis kann man immerhin mit einer Quasi-Vergrösserung von bis zu 20% rechnen.

Erhöhung der bewegten Masse

Dämpfungsmaterial in der Box hat zur Folge, dass die effektiv bewegte Masse (Konus und Schwingspule) scheinbar grösser wird. Genaue Erklärungen für diese Erscheinung gibt es nicht. Möglicherweise betrifft es die in Konusnähe mitschwingende Luftmasse, deren Bewegung durch das Dämpfungsmaterial gebremst wird. Möglicherweise werden auch Teile des Absorptionsmaterials zum Mitbewegen angeregt. Bei massiv gefüllten Gehäusen erhöht sich die bewegte Masse um bis zu 20%.

Erhöhung der mechanischen Verluste

Im schallabsorbierenden Material wird Energie durch Reibung vernichtet (exakt: in Wärme umgewandelt). Die Folge sind mechanische Verluste des bewegten Systems (Konus und Schwingspule). Diese Verluste sind am grössten, wenn sich das Material in einem Bereich, in dem die Schallschnelle gross ist, also zum Beispiel unmittelbar hinter dem eingebauten Lautsprecher.

Der Einfluss dieser Dämpfung auf den mechanischen Q-Wert des Lautsprechers kann nicht vernachlässigt werden, denn ein (üblicher mechanischer Q-Wert von 5 - 10 wird auf Werte zwischen 2 und 5 reduziert. Damit wird natürlich auch der Q-Wert der Box entsprechend kleiner.

Konsequenz für die Praxis

Im Prinzip hat das Einbringen von Absorptionsmaterial in eine geschlossene Box Vorteile:

- Das Gehäusevolumen kann um bis zu 20% reduziert werden.
- Wahlweise kann man die Dämpfung der Box dazu benutzen, entweder den Wirkungsgrad zu erhöhen, die Resonanz- und Grenzfrequenz nach unten zu verschieben, zur Erhöhung des Wirkungsgrads oder zum Realisieren einer tieferen Resonanzfrequenz f_0 und Grenzfrequenz f_3 . Man bezahlt dafür den Preis von grösseren mechanischen Verlusten. Dies spielt aber in der Praxis keine Rolle, da die Vorteile der Verbesserung der erwähnten Box-Parameter deutlich überwiegen.
- Man kann eine vorhandene Box aber nicht einfach mit zusätzlichem Absorptionsmaterial zu füllen. Die Box muss zwingend für die veränderten Lautsprecher- und Gehäuse-Parameter neu berechnet werden.

Dämpfungsmaterial

Als Dämpfungsmaterial werden Glasfasermatten, Akustik-Schaumstoffe, Watte und kurzfasrige Schafwolle verwendet. Der empirisch Einfluss der Gehäusedämpfung durch diese Materialien auf eine geschlossene Box kann man der folgenden Tabelle entnehmen (Quelle: *The Loudspeaker Design Cookbook* von Vance Dickason)

%Füllung	f_3	Q_{tc}
0	39.94	1.19
50	38.31	0.98
100	37.37	0.73

Berechnung von bedämpften Gehäusen

Mit Dämpfungsmaterial gefüllte Boxen werden prinzipiell genau gleich berechnet wie leere Gehäuse. Die durch die Gehäusefüllung veränderten Werte der Parameter müssen aber berücksichtigt werden.

Die Folgenden Berechnungsgrundlagen basieren auf der Annahme, dass das Gehäusevolumen durch die Füllung virtuell um 20% vergrössert wird

Neuer Wert für Q_{tc} bei gleichem Box-Volumen

$$V_{ab} = 1.2 \cdot V_b \quad (43)$$

$$\alpha = V_{as}/V_b \quad (44)$$

$$L = (a + 1)^{1/2} \quad (45)$$

$$Q_{tc}' = L \cdot Q_{ts} \quad (46)$$

$$Q_{tc} = ((1/Q_{tc}') + 0.2)^{-1} \quad (47)$$

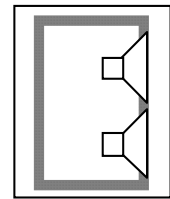
Neues Box-Volumen bei gleichem Q_{tc}

$$V_b = V_{ab} / 1.2 \quad (48)$$

3.2.5 Geschlossene Boxen mit mehreren Chassis

2 Lautsprechern, übliche Anordnung

- f_s unverändert
- Q_{ts} unverändert
- V_{as} doppelt so gross
- Membranauslenkung halb so gross



2 Lautsprecher, Push Pull- Konfiguration

- f_s unverändert
- Q_{ts} unverändert
- V_{as} doppelt so gross
- Membranauslenkung halb so gross
- Nichtlinearitäten des Lautsprechers gleichen sich aus

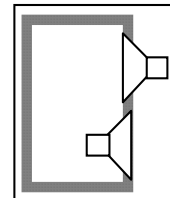


Bild 68, 69

2 Lautsprecher, Compound-Konfiguration

- f_s unverändert
- Q_{ts} unverändert
- V_{as} halb so gross
- Membranauslenkung unverändert
- je nach Einbau gleichen sich die Nichtlinearitäten des Lautsprechers aus

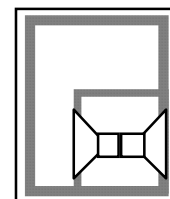
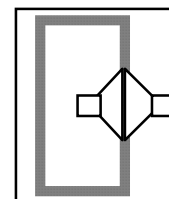
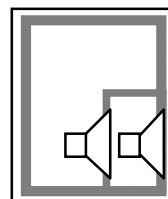


Bild 70, 71, 72

Wichtig:

- Werden die zwei Lautsprecher parallel geschaltet, wird die Impedanz der Box halbiert. Werden sie in Serie geschaltet, wird die Impedanz verdoppelt.
- Je nach Art des Einbaues muss einer der zwei Lautsprecher verpolt angeschlossen werden.

3.2.6 Entzerrung des Tieftonfrequenzgangs

Bild 73 Impedanz- und Phasenverlauf mit und ohne Entzerrung

Wie bereits gesagt handelt es sich bei einer geschlossenen Box um einen Hochpass zweiter Ordnung mit einem festgelegten Q-Wert (Q_{tc}) einer Resonanzfrequenz (f_c) und einer unteren Grenzfrequenz (f_3). Mit einem zusätzlichen, auf die Box abgestimmten aktiven Filter kann der Frequenzgang im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter verändert und entzerrt werden. So kann entweder f_3 tiefer gelegt, oder (und) die Impulswiedergabe verbessert werden. Mit einer einfachen Tiefenanhebung mit einem Graphic oder Parametric Equalizer ist das aber nicht sauber möglich. Die Box als Hochpass 2ter Ordnung muss mit einem zusätzlichen "elektrischen" Filter ergänzt und modifiziert werden. Filter und Box bilden dann zusammen ein System mit veränderten Eigenschaften.

Beispiel:

Eine Box mit einem Q-Wert von $Q_{tc} = 0.707$ und einer unteren Grenzfrequenz von f_3 soll entzerrt werden.

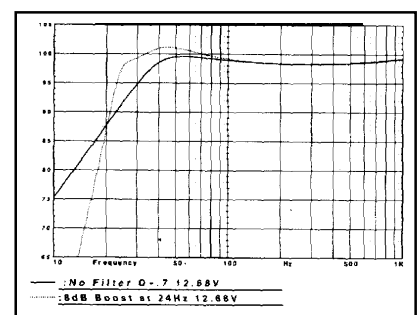
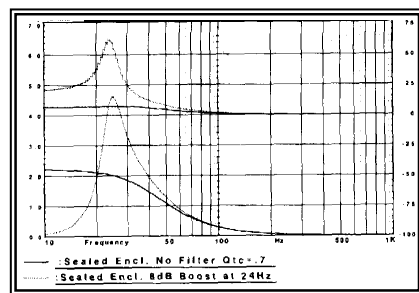


Bild 74 Frequenzgang mit und ohne Entzerrung

Mit entsprechenden Filtern ist folgendes möglich:

Original- Q_{tc}	Q_{tc} entzerrt	max. Pegel	f_3 entzerrt
B2-0.707	B4-0.707	+ 8dB	$f_3/2$
B2-0.707	B2-0.707	+10dB	$f_3/2$

Die Möglichkeiten und Resultate einer Entzerrung einer Box mit einem Q-Wert von $Q_{tc} = 0.7$, einer Grenzfrequenz von $f_3 = 35\text{Hz}$ und einem Tiefenabfall von 12 dB/Oktav (Butterworth 2ter Ordnung) sind in den folgenden Bilder zu sehen. Die "entzerrte" Grenzfrequenz liegt bei 24Hz, die maximale Anhebung beträgt 8dB. Der Frequenzgang hat nun einen B4-Charakter mit einem Abfall des Frequenzgangs von 38,5 db/Oktav

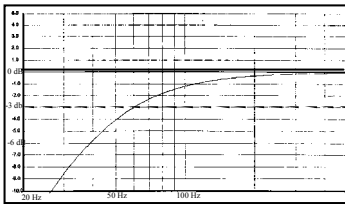
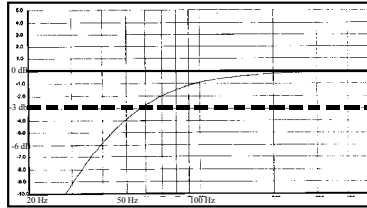
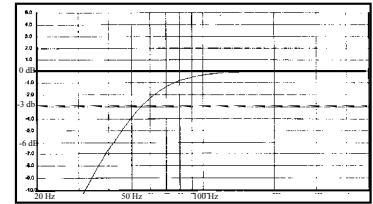
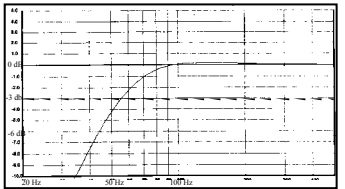
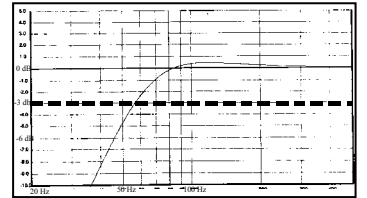
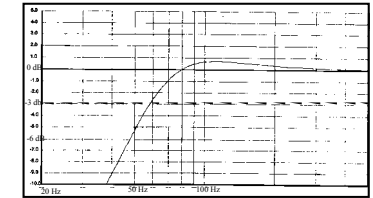
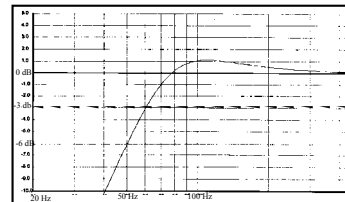
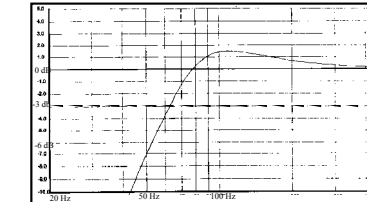
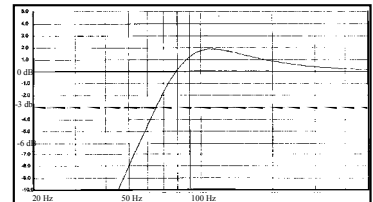
3.2.7 Beispiel für die Möglichkeiten eines Tieftonchassis

Tief- Mitteltontochassis: Vifa PLW 18 225/8 mit folgenden technischen Eigenschaften

- Frequenzbereich: 31 - 5000 Hz
- Nennimpedanz: 8 Ohm
- Kennschalldruck SPL (1 W/m); 89 dB
- Nennbelastbarkeit: 60 W
- max Belastbarkeit, Langzeit: 180 W
- S_d : 138 cm²
- Schwingspulendurchmesser: 25 mm
- lineare Auslenkung: 4 mm
- L_e : 0.6 mH
- R_e : 5.8 Ohm
- F_s : 31 Hz
- Q_{ms} : 2.8 • Q_{es} : 0.47 • Q_{ts} : 0.4 • V_{as} : 49.5 l • M_{md} : 12.5 g

Mögliche Box-Abstimmungen

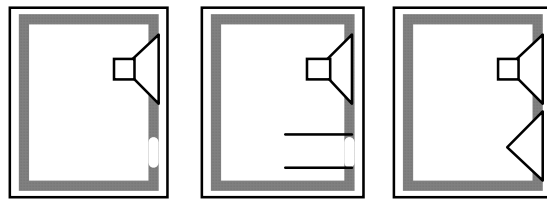
Bild 75 - 83

85 l, $F_c = 39$ Hz, $Q_{tc} = 0.5$, $\square = 0.6$ 45 l, $F_c = 45$ Hz, $Q_{tc} = 0.577$, $\square = 1.12$ 226 l, $F_c = 55$ Hz, $Q_{tc} = 0.707$, $\square = 2.2$ 16.6 l, $F_c = 62$ Hz, $Q_{tc} = 0.8$, $\square = 3$ 14 l, $F_c = 66$ Hz, $Q_{tc} = 0.85$, $\square = 3.5$ 12 l, $F_c = 70$ Hz, $Q_{tc} = 0.91$, $\square = 4$ 10 l, $F_c = 76$ Hz, $Q_{tc} = 0.98$, $\square = 5$ 8.5 l, $F_c = 81$ Hz, $Q_{tc} = 1.05$, $\square = 5.8$ 7.5 l, $F_c = 86$ Hz, $Q_{tc} = 1.11$, $\square = 6.6$

3.3 Bassreflex-Boxen

Im Unterschied zu den geschlossenen Boxen haben Bassreflexboxen eine zusätzliche Gehäuseöffnung. Diese Öffnung zusätzlich eine Öffnung oder einen Tunnel.

Bild 84 - 86 mögliche Ausführungen von Bassreflexgehäuse



a) mit einfacher Öffnung b) mit Tunnel c) mit Passivmembran

3.3.1 Eigenheiten von Bassreflexboxen

Allgemeines

Im Vergleich mit gleich grossen geschlossenen Boxen haben Bassreflexboxen folgendes Vorteile (gilt für den Fall, dass in beiden Boxen der gleiche Lautsprecher eingebaut wird):

- Im Bereich der Resonanzfrequenz f_c des Gehäuses sind die Membranauslenkungen kleiner. Die Folge sind grössere akustischen Leistung und geringere IM- und Dopplereffekt-Verzerrungen.
- Die Grenzfrequenz f_3 liegt tiefer.
- Die Empfindlichkeit ist (theoretisch) 3dB höher.

Ein Vergleich zeigt aber auch Nachteile der Bassreflexbox auf:

- Unterhalb von f_3 arbeitet der Lautsprecher, wie wenn er in ein offenes Gehäuse eingebaut wäre. Die Membranbewegungen werden nicht mehr von einem Luftpolster kontrolliert. Sehr tieffrequente Störgeräusche (zum Beispiel Trittschall) haben exzessive Membranauslenkungen zur Folge.
- Bassreflexboxen müssen exakt abgestimmt werden.

Toleranzen der Lautsprecherparameter können zu einer völlig andern, unoptimalen Abstimmung führen.

Q-Wert und Frequenzgang

Wie bei der geschlossenen Box wird der Frequenzgang einer Bassreflexbox im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter vom Q-Wert der Box bestimmt. Der Q-Wert Q_{tc} kann aber nicht wie bei einer geschlossenen Box im Hinblick auf eine gewünschte Gehäusegrösse oder einen Frequenzgang frei gewählt werden. Beim Konzipieren einer Bassreflexbox geht man immer von einer bestimmten Boxen-Abstimmung aus. Der Rest, also die Gehäusegrösse, der Q-Wert Q_{tc} und die Grenzfrequenz f_3 ergeben sich dann automatisch. In jedem Fall haben aber Bassreflexboxen unterhalb der Grenzfrequenz einen wesentlich steileren Abfall als geschlossenen Boxen (geschlossen 12 dB/Oktav, Bassreflexboxen bis 30 dB/Oktav).

Anforderungen an den Lautsprecher

Geeignete Lautsprecher müssen einen Q-Wert Q_{ts} haben, der zwischen 0.2 und 0.5 liegt. Höhere Q-Werte führen zu Abstimmungen mit nicht-optimalen Wiedergabeeigenschaften.

3.3.2 mögliche Bassreflexbox-Abstimmungen

Allgemein

- BB4 (forth-order boom box)
Typisch für diese Abstimmung ist Ueberhöhung des Frequenzgangs bei der Grenzfrequenz f_3 . Die Charakteristik entspricht der einer geschlossenen Box mit einem Q-Wert Q_{tc} von 1.2 .
- SBB4 (super forth order boom box)
Es handelt sich um relativ grosse Boxen mit einer tiefen Abstimmung und guter Impuls-wiedergabe.
Der Lautsprecher muss einen möglichst kleinen Q-Wert Q_{ts} haben.
- SC4 (forth order sub-Chebychev)
Gehäusegrösse und Grenzfrequenz entsprechen der SBB4-Box, die Abstimmung ist aber anders. Bezüglich des Q-Werts des Lautsprechers gilt das gleiche wie für die SBB4-Abstimmung. Die Impulswiedergabe ist aber weniger optimal.
- QB3 (quasi third-order Butterworth)
Diese Abstimmung wird häufig verwendet, weil das Gehäuse für ein bestimmtes Lautspre-cher- Q_{ts} relativ klein ist und die Grenzfrequenz f_3 tiefer liegt als bei andern Abstimmun-gen. Typisch für diese Abstimmung ist aber eine schlechte Impulswiedergabe.
- SQB3 (super-third-order quasi-Butterworth)
Es handelt sich um die Version einer QB3-Abstimmung für Lautsprecher mit hohen Q-
Werten

Diskrete Abstimmungen

- B4 (forth order Butterworth)
- BE4 (forth order Bessel)
- IB4 (Butterworth inter-order)
Diese Abstimmungen lassen sich nur für einen bestimmten Q-Wert Q_{ts} des
Lautsprechers realisieren
- C4: Abstimmung mit den Eigenheiten eines Chebychev-Filters 4ter Ordnung

3.3.3 Berechnung von Bassreflexboxen

Die Berechnung von Bassreflexboxen ist aufwendig und kompliziert. Man nimmt sie am bes-ten mit Hilfe von Computerprogrammen vor.

Tabelle Vergleich einiger Abstimmungen

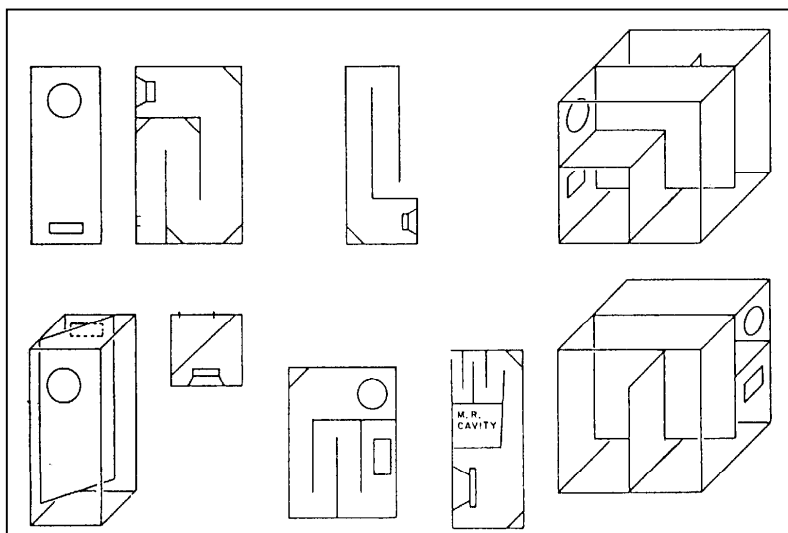
Abstimmung	Vb(rel.)	fb(Hz)	f3(Hz)	Abfall(db/Oktav)
SBB4	1.35	25	36	18
SC4	1.2	27	36	19
QB3	1.0	31	36	20
SQB3	3.8	30	34	27
BB4	1.4	37	30	30
C4	2.65	30	27	30

3.4 Transmission Line-Gehäuse

Bild 87

Bei den Transmission Line-Boxen handelt es sich um Schallführungen, die mit Resonanzeffekten arbeiten. Diese Effekte spielen im Zusammenhang mit den Parametern der eingebauten Lautsprecher eine grosse Rolle, da sie die Eigenschaften des Systems Lautsprecherchassis-Gehäuse wesentlich mitbestimmen.

Bei den Transmission Line-Gehäusen handelt es sich um rückwirkungs- und resonanzfreie Schallführungen. Es handelt sich aber um eine in Fachkreisen nicht unumstrittene Schallführung. Gegner sagen, dass bei gleicher Gehäusegrösse nicht bessere Ergebnisse als mit geschlossenen oder Bassreflex-Boxen realisiert werden können.



Grundidee:

- Der von der Membranrückseite in das Gehäuse abgestrahlte Schallenergie wird bis zu einer Frequenz von etwa 70 Hz hinunter vollständig und rückwirkungsfrei absorbiert.
- Transmission Line-Gehäuse haben eine untere Grenzfrequenz. Es handelt sich um akustische Hochpässe.

Funktionsweise und Aufbau

Der Schall im Gehäuseinnern läuft durch einen mit schallabsorbierendem Material gefüllten langen Kanal, der in eine Öffnung im Gehäuse mündet. Die Eigenschaften des eingebauten Lautsprechers werden so von der Schallführung nicht beeinflusst.

Länge und Querschnitt der Umwegleitung

Die Länge der Umwegleitung sollte theoretisch mindestens einem Viertel der Wellenlänge der Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechers entsprechen. Da der Kanal aber mit schallabsorbierendem Material gefüllt wird, beträgt die Schallgeschwindigkeit im Kanalinnern nur etwa 40% der Schallgeschwindigkeit in Luft. Dies bewirkt, dass im beschriebenen Fall die Kanallänge der halben Wellenlänge der Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprecherchassis entspricht.

In der Praxis wird die Kanallänge auf eine Frequenz bezogen, die leicht über der Resonanzfrequenz liegt.

Der Querschnitt des Kanals hat direkt hinter dem Lautsprecher einen Querschnitt, der um mindestens 25% grösser ist als die Membranfläche. Er kann aber auch doppelt so gross sein. Die Umwegleitung hat von der Lautsprechermembran zur Öffnung (Ende des Kanals) einen konischen Verlauf. Der Querschnitt der Öffnung muss dem der Lautsprechermembran entsprechen.

Schallabsorption im Umwegkanal

Direkt hinter dem Lautsprecherchassis wird das schallabsorbierende Material relativ dicht, und dann mit abnehmender Dichte bis zu den letzten 20 cm der Kanallänge eingebracht. Die letzten 20 cm müssen frei sein von schallabsorbierendem Material.

Klangliche Eigenheiten von Transmission Line-Boxen

- Klarer und resonanzfreier Tiefbass, der aber "unspektakulär" klingt.
- Je nach Art des Dämpfungsmaterials im Kanal können die unteren Mittellagen verfärbt klingen. Dies ist vor allem der Fall, wenn das Material nicht mit regelmässig-abnehmender Dichte eingebracht wird.

Praktische Ausführungen von Transmission Line-Gehäusen

Ueblicherweise wird der Kanal so gefaltet, dass ein Rechteckgehäuse resultiert. Bei der Art der Faltung ist der Fantasie der Entwickler keine Grenze gesetzt.

3.5 Zusammenstellung der Eigenheiten von Schallführungen

3.5.1 geschlossene Box

Der Frequenzgang im Bereich der Resonanzfrequenz und das Impulsverhalten der Box werden vom Q-Wert Q_{tc} der Box bestimmt.

- $Q_{TC} = 0.5$, kritische Dämpfung: keine Ueberhöhung, aber der -3 dB-Punkt liegt eine Oktave über der Resonanzfrequenz. Die Sprungantwort ist ideal.
- $Q_{TC} = 1/\sqrt{3} = 0.577$, Bessel (max flat delay), entspricht praktisch der kritischen Dämpfung
- $Q_{TC} = 1/\sqrt{2} = 0.707$, Butterworth-Funktion (B2). Optimaler Frequenzgang und gute Sprungantwort
- $Q_{TC} > 1/\sqrt{2}$, Chebychev-Funktion (C2). Ueberhöhung bei, und Welligkeit oberhalb der Resonanzfrequenz. Sprungantwort nicht ideal

Qtc - Wert und Frequenzgang

- 12 dB/Oktav Abfall unterhalb der Grenzfrequenz bei einem Q-Wert von 0.707
- beliebige Q-Werte möglich
- Box bei gleicher unterer Grenzfrequenz grösser als Bassreflex

3.5.2 Bassreflex-Gehäuse

mit Port

- 24 dB-Abfall
- verschiedene Abstimmungen möglich
- Luftgeräusch in der Reflexöffnung problematisch
- Box bei gleicher unterer Grenzfrequenz kleiner als geschlossen Box

mit Passivmembran

- wie Bassreflex mit Port
- keine Windgeräusche
- aufwendig aufgebaut

3.5.3 Transmission Line-Gehäuse

- theoretisch ideal, praktisch schwer zu realisieren
- gross und aufwendig gebaut.

4. Frequenzweichen

4.1 Allgemeines

Es gibt keine Lautsprecherchassis, die den ganzen Hörbereich (20 Hz - 20 kHz) frequenzmässig abdecken, und gleichzeitig die notwendige akustische Leistung abstrahlen können. Deshalb ist es üblich, den Hörbereich mit einer sogenannten Frequenzweiche in mindestens zwei, unter Umständen aber in bis zu fünf Bereiche aufzuteilen. Jeder Bereich wird dann von einem für den jeweiligen Frequenzbereich geeigneten Chassis abgestrahlt. Die Frequenzaufteilung muss so geschehen, dass sich die Teilbereiche akustisch sauber addieren. Das gilt sowohl im Bezug auf die Schall-Leistung in den Uebergangsbereichen, wie auch die unverfälschte Wiedergabe von impulsartigen Schallvorgängen.

4.2 Möglichkeiten für die Frequenzaufteilung

passive Weichen

Ein einziger Leistungsverstärker liefert die Leistung für alle Teilbereiche. Die Frequenzaufteilung geschieht zwischen diesem Verstärker und den Teilbereich-Chassis. Passiver Weiche sind aus Kondensatoren und Induktivitäten aufgebaut.

Vorteile:

- Die Box kann an jedem geeigneten Leistungsverstärker angeschlossen werden.
- Passivweichen sind betriebssicher (sofern hochwertige Bauteile verwendet werden).

Nachteile:

- Die Frequenzaufteilung geschieht auf der "Leistungsseite" des Verstärkers. Die Weichenbauteile müssen leistungsmässig entsprechend ausgelegt sein, und ihre Eigenheiten (zum Beispiel ohmscher Widerstand der Spulenwicklung oder Rest- und Leckströme der Kondensatoren) können sich bemerkbar machen.
- Die Impedanzen und die frequenzabhängigen Impedanzgänge der angeschlossenen Lautsprecher beeinflussen die Weicheneigenschaften.
- Bei grösseren Leiterlängen beeinflussen die Eigenheiten der Kabel (ohmscher Widerstand, Induktivität, Kapazität) die Eigenschaften des Systems Verstärker - Lautsprecher.

aktive Weichen

Jeder Bereichslautsprecher wird von einem eigenen Leistungsverstärker gespeist. Die Frequenzaufteilung geschieht vor diesen Leistungsverstärkern.

Die Filter, es handelt sich um Tief-, Band- und Hochpässe, werden in der Regel mit aktiven Filterschaltungen realisiert. Es ist aber auch möglich, die Filter passiv mit Kondensatoren, Widerständen und Induktivitäten aufzubauen.

Vorteile von Aktivweichen:

- Die Bereichslautsprecher sind direkt an niederohmigen Verstärkerausgängen angeschlossen.
- Die Weichen können nach Belieben konzipiert werden.
- Die Lautsprecher können mit normalen abgeschirmten Kabeln mit dem Rest der Anlage verbunden werden. Diese Verbindungen sind unproblematisch, da keine Leistungen transportiert werden müssen und der Widerstand der Kabel nicht den Innenwiderstand der Leistungsquelle für den Lautsprecher erhöhen.

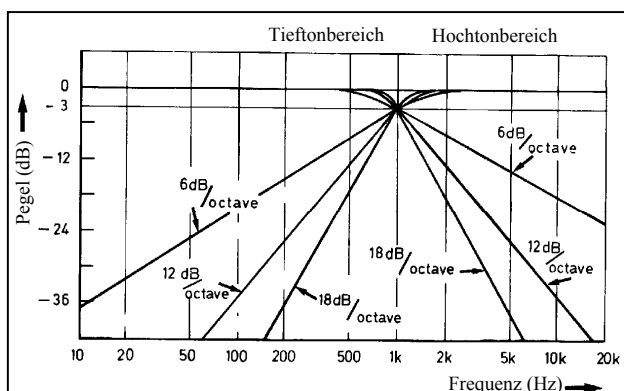
Nachteil:

- grösserer Aufwand

4.3 Filtersteilheit

Bild 88

Das wesentliche Charakteristikum vom Frequenzweichen ist die Steilheit der Abtrennung an den jeweiligen Bereichsenden. Üblich sind Weichen mit einem Abfall von 6 dB/Oktave, 12 dB/Oktave, 18 dB/Oktave und 24 dB/Oktave. Bei aktiven Weichen werden aber unter Umständen Steilheiten von bis zu 36 dB/Oktave realisiert.



4.4 Filterart

Wie alle Filter können auch Frequenzweichen für Lautsprecherkombination als

- Butterworth-Filter,
- Chebychev-Filter,
- Bessel-Filter,
- Linkwitz-Filter, etc.

konzipiert werden. Jede dieser Filterarten hat typische Eigenschaften im Bezug auf die Welligkeit des Frequenzgangs, die Addition der Teilbereiche (macht sich vor allem bemerkbar in den Uebergangsbereichen) und die Impulswiedergabe.

4.5 Weichenschaltungen

Bild 89

4.5.1 Weiche 1. Ordnung mit 6 dB/Oktav Abfall

Es handelt sich um den einzigen Weichentyp mit einem minimalen Phasengang. Das heisst, das summierte Ausgangssignal hat den gleichen Frequenz- und Phasengang wie das Eingangssignal. Deshalb auch die Bezeichnungen phase coherent oder linear phase.

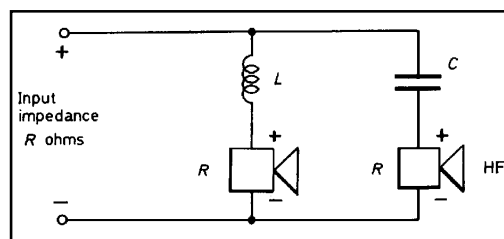
Realisierbar ist diese Weiche nur mit Butterworth-Charakteristik.

- Die Phase ist gegenüber dem Eingangssignal um 90° gedreht.
- Die Lautsprecher können auch verpolt angeschlossen werden.
- Es handelt sich um die einfachstmögliche Frequenzweiche, und zugleich die einzige Weichenschaltung mit idealen Uebertragungseigenschaften.

Berechnung:

$$L = R / 2\pi f_C$$

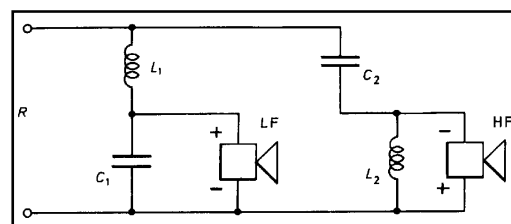
$$C = 1 / 2\pi f_C R$$



4.5.2 Weiche 2. Ordnung mit 12 dB/Oktav Abfall

Weichen 2. Ordnung können als Butterworth-, Linkwitz-Riley-, Bessel- oder Chebychev-Filter aufgebaut werden. Die Filterart wird durch die Dimensionierung der Bauteile realisiert.

Bild 90



Butterworth (Q = 0.707):

Bei gleicher Polung der Lautsprecher hat das summierte akustische Ausgangssignal eine Phasenlage von 180° (bezogen auf das Eingangssignal), sowie eine schmale, tiefe Senke bei der Trennfrequenz.

Bei verpolten Lautsprechern sind Eingangs- und Ausgangssignal in Phase, und der Frequenzgang hat bei der Trennfrequenz eine Ueberhöhung von 3 dB

$$\begin{array}{ll} \text{Berechnung:} & C1 = 0.1125 / R_f \qquad C2 = 0.1125 / R_f \\ & L1 = 0.2251R / f \qquad L2 = 0.2251R / f \end{array}$$

Linkwitz-Riley (Q = 0.49)

Es handelt sich um ein Allpass-Filter. Das summierte akustische Ausgangssignal hat einen linearen Frequenzgang.

$$\begin{array}{ll} \text{Berechnung:} & C1 = 0.0796 / R_f \qquad C2 = 0.796 / R_f \\ & L1 = 0.3183R / f \qquad L2 = 0.3183R / f \end{array}$$

Bessel (Q = 0.58)

Der summierte akustische Frequenzgang hat eine Ueberhöhung von 1 dB bei der Trennfrequenz (mit verpolten Lautsprechern)

$$\begin{array}{ll} \text{Berechnung:} & C1 = 0.0912 / R_f \qquad C2 = 0.0912 / R_f \\ & L1 = 0.2756R / f \qquad L2 = 0.2756R / f \end{array}$$

Chebyshev (Q = 1)

Der summierte akustische Frequenzgang hat eine Ueberhöhung von 6 dB bei der Trennfrequenz.

Durch Auseinander-Verschieben der Uebergangsfrequenzen des Tiefton- und Hochton-Bereichs um den Faktor 1.5 hat der summierte Frequenzgang eine Welligkeit von ± 2 dB im Uebergangsbereich.

$$\begin{array}{ll} \text{Berechnung:} & C1 = 0.1592 / R_f \qquad C2 = 0.1592 / R_f \\ & L1 = 0.1592R / f \qquad L2 = 0.1592 / R_f \end{array}$$

4.5.3 Weiche 3. Ordnung mit 18 dB/Oktav Abfall

Die Weiche 3. Ordnung kann nur als Butterworth-Filter realisiert werden. Der summierte akustische Frequenzgang ist linear, aber (verursacht durch eine Phasendrehung von 90° zwischen den Bereichen) bei einem Beschallungswinkel von 15° bezogen auf die Nullachse der Lautsprecher (siehe Bild 67). Je nach Polung der Lautsprecher beträgt der Abstrahlwinkel $+15^\circ$ (gleiche Polung) oder -15° (verpolte Lautsprecher).

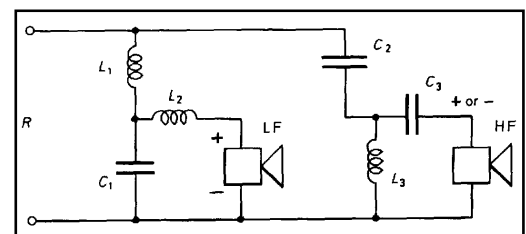


Bild 91

Berechnung von L und C:

$$\begin{array}{lll} C1 = 0.1061 / R_f & C2 = 0.3183 / R_f & C3 = 0.2122 / R_f \\ L1 = 0.1194R / f & L2 = 0.2387R / f & L3 = 0.0796R / f \end{array}$$

4.5.4 Weiche 4. Ordnung mit 24 dB/Oktav Abfall

Diese Weiche kann als Butterworth-, Linkwitz-Riley-, Bessel-, Legendre- oder Gauss-Filter realisiert werden. Es handelt sich um die Kombination von zwei Filtern 2. Ordnung mit gleichen oder unterschiedlichen Q-Werten.

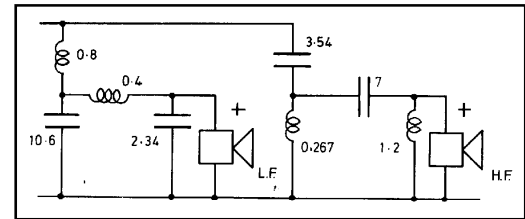


Bild 92

Butterworth (Q = 1.307 und 0.541, total-Q = 0.707)

Bei gleich gepolten Lautsprechern addieren sich die Teilbereiche zu einem Frequenzgang mit einer Senke von 3 dB bei der Trennfrequenz. Bei verpolten Lautsprechern resultiert eine entsprechende Ueberhöhung von 3 dB.

Berechnung:	$C1 = 0.1040 / R_f$	$C2 = 0.1470 / R_f$
	$C3 = 0.2509 / R_f$	$C4 = 0.0609 / R_f$
	$L1 = 0.1009R / f$	$L2 = 0.4159R / f$
	$L3 = 0.2437R / f$	$L4 = 0.1723R / f$

Linkwitz-Riley (Q für beide Teilfilter = 0.707, Qtotal = 0.49)

Das summierte akustische Ausgangssignal hat einen geradlinigen Frequenzgang.

Berechnung:	$C1 = 0.0844 / R_f$	$C2 = 0.1688 / R_f$
	$C3 = 0.2533 / R_f$	$C4 = 0.0563 / R_f$
	$L1 = 0.0.1R / f$	$L2 = 0.4501R / f$
	$L3 = 0.3R / f$	$L4 = 0.15R / f$

Bessel

Bessel-Frequenzweichen 4. Ordnung haben weder ein lineares summiertes Ausgangssignal, noch eine Allpass-Charakteristik. Ein linearer Frequenzgang kann nur realisiert werden, wenn die Trennfrequenzen der Teilbereiche um den Faktor 0.9 überlappend verschoben wird.

Berechnung:	$C1 = 0.702 / R_f$	$C2 = 0.0.0719 / R_f$
	$C3 = 0.2336 / R_f$	$C4 = 0.0504 / R_f$
	$L1 = 0.0862R / f$	$L2 = 0.4983R / f$
	$L3 = 0.3583R / f$	$L4 = 0.1463R / f$

Legendre

Phasengang und Gruppenlaufzeiten dieses Filters sind nicht ideal (Sprung bei der Trennfrequenz).

Der summierte akustische Ausgang hat eine Ueberhöhung von 5 dB bei der Trennfrequenz bei gleich gepolten Lautsprechern. Ein linearer Frequenzgang ist realisierbar, wenn die Trennfrequenzen der Teilbereiche um den Faktor 1.15 auseinandergeschoben werden.

Berechnung:	$C1 = 0.1104 / R_f$	$C2 = 0.1246 / R_f$
	$C3 = 0.2365 / R_f$	$C4 = 0.0.091 / R_f$
	$L1 = 0.1073R / f$	$L2 = 0.2783R / f$
	$L3 = 0.2294R / f$	$L4 = 0.2034R / f$

Gauss

Die Gruppenlaufzeiten entsprechen denen eines Bessel-Filters. Der summierte akustische Ausgang hat aber einen nahezu linearen Frequenzgang.

Berechnung:	$C1 = 0.0767 / R_f$	$C2 = 0.1491 / R_f$
	$C3 = 0.2235 / R_f$	$C4 = 0.0768 / R_f$
	$L1 = 0.1116R / f$	$L2 = 0.3251R / f$
	$L3 = 0.3253R / f$	$L4 = 0.1674R / f$

4.6 Kompensations-Schaltungen

4.6.1 Korrektur des Impedanzverlaufs

Frequenzweichen arbeiten nur korrekt, wenn sie mit einem einfachen Belastungswiderstand abgeschlossen sind. Nun ist ein Lautsprecher leider alles andere als einfache ohmsche Last. Der Impedanzverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz ist komplex. Besonders problematisch ist die Impedanzüberhöhung bei der Resonanzfrequenz und der Anstieg der Kurve im hohen Frequenzbereich.

Die Bilder zeigen die Korrekturmaßnahmen, mit denen der Impedanzverlauf eines Lautsprechers linearisiert werden kann.

Für R_c und C gilt folgendes:

$$R_c = 1.25 \cdot R_E \quad C = L_e / R_c^2$$

Die Bauteile des Korrekturgliedes im Bild 71 können mit Hilfe der folgenden Formeln dimensioniert werden:

$$C = 0.1592 / (R_E \cdot Q_{es} \cdot f_s)$$

$$L = (0.1592 \cdot Q_{es} \cdot R_E) / f_s$$

$$R_c = R_E + (Q_{es} \cdot R_E) / Q_{ms}$$

oder, weniger genau aber einfacher:

$$C = 0.03003 / f_s$$

$$L = 0.02252 / (f_s^2 \cdot C)$$

Bild 93

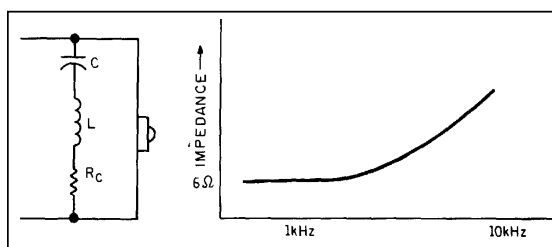
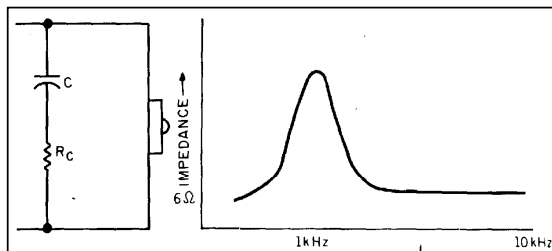
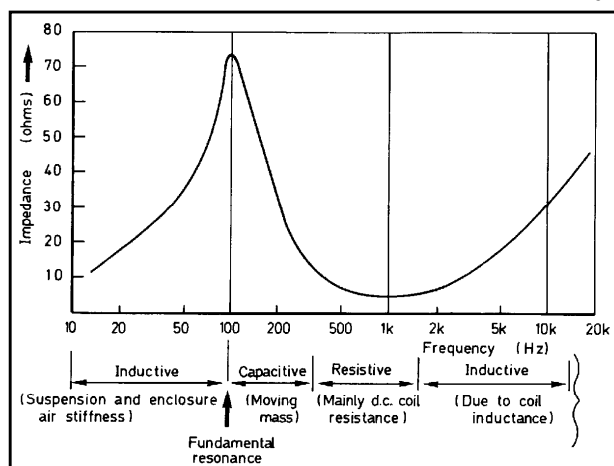


Bild 94, 95

4.6.2 Korrektur des Frequenzgangs

Anhebung

Für die Werte von L und C gelten (Der Wert von R wird experimentell ermittelt) :

$$L = 0.15916 / f$$

$$C = 0.15916 / f$$

Korrektur von Ueberhöhung des Frequenzgangs

Für die Bauteile des korrigierenden Notchfilters gilt:

Berechnung: $C = 0.03003 / f$

$$L = 0.02252 / (f_2 \cdot C)$$

$$R = 1 / (6.2832 \cdot C \cdot B)$$

mit $B = -3 \text{ dB-Bandbreite } (f_2 - f_1)$

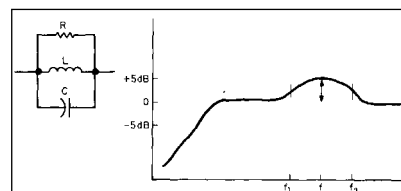
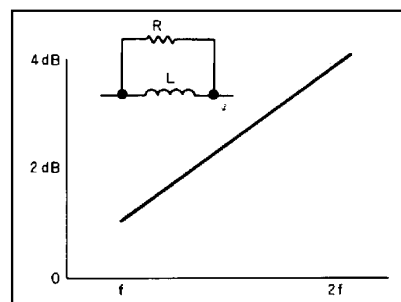


Bild 96, 97

8.6.3 Empfindlichkeitsanpassung für die Teilbereiche

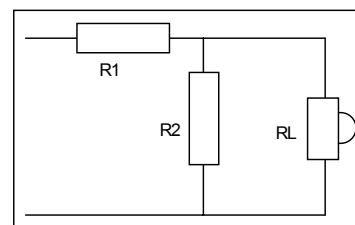
Die Lautsprecherchassis der Teilbereiche haben nur in den seltensten Fällen die gleiche Empfindlichkeit. Da man dem Tieftonteil die volle Leistung zukommen lassen will, ist es üblich, dass Mittelton- und Hochtonlautsprecher eine grössere Empfindlichkeit haben als das Tieftonchassis.

Bild 98

Berechnung: $R_2 = (10^{(A/20)} \cdot Z) / (1 - 10^{(A/20)})$

$$R_1 = Z - ((1 / R_2) + (1 / Z))$$

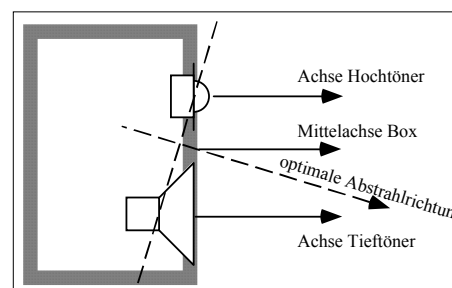
mit Z Impedanz des Lautsprechers A notwendige Pegelabsenkung in -dB



4.7 Problem der akustischen Addition der Teilbereiche

Bild 99

Die Addition der akustischen Signale werden zusätzlich von der "zeitlichen" Situation der Teilbereiche mitbestimmt. Der Zeit-Bezugspunkt für diese akustische Addition ist dabei nicht die Frontwand der Box, sondern die Ebenen der Schwingspulen des Tief/Mittelton- und des Hochtonchassis. Beim üblichen Chassiseinbau in einer üblichen, quaderförmigen Box befinden sich die zwei Schwingspulen aber nicht in einer Ebene (Bild 107). Eine saubere akustische Addition findet nur in der mit "optimale Abstrahlrichtung" bezeichneten Richtung statt.



Dies spielt vor allem bei der Wiedergabe von impulsförmigen Schallvorgängen eine Rolle: Auf der Achse der Box addieren sich die Signale nicht zu einem dem Eingangssignal entsprechenden Impuls, denn der vom Hochtöner abgestrahlte Schallanteil trifft früher bei einem Zuhörer ein als der des Tief/Mitteltöners. Das gleiche gilt natürlich für jede andere, mit Ausnahme der optimalen Abstrahlrichtung.

Beheben lässt sich diese Unzulänglichkeit nur durch einen tiefenversetzten Einbau des Hochtoners, durch eine zeitverzögerte Ansteuerung des Hochtoners, oder durch die Verwendung eines konzentrisch aufgebauten Kombinationslautsprechers. Mit Ausnahme des Falls eines ideal-konzentrisch aufgebauten Kombinationslautsprechers (Beispiel: Chassis von Tannoy und Kef) ist die Impulswiedergabe aber auch wieder nur in einer einzigen Schallabstrahlrichtung sauber.

5. Hornlautsprecher

5.1 Allgemeines

5.1.1 Eigenschaften von Hornlautsprechern

Ein Hauptnachteil von direktstrahlenden dynamischen Lautsprechern ist der geringe Wirkungsgrad, der in der Praxis selten einen Wert von einigen wenigen Prozent übersteigt. Ursache ist (vor allem im Tieftonbereich) die kleine Abstrahlfläche.

Wenn der (für den interessierenden Frequenzbereich) zu kleinen Abstrahlfläche ein Schalltrichter vorgesetzt wird, findet eine Schallbündelung statt, die Schallenergie wird in einen kleineren Raumwinkel abgestrahlt. Die Folge dieser gerichteten Abstrahlung ist eine Erhöhung des Wirkungsgrads auf Werte von bis zu 40%.

Hornlautsprecher werden immer dann eingesetzt, wenn grosse Leistungen abgestrahlt werden müssen (Bild 129 – 131).

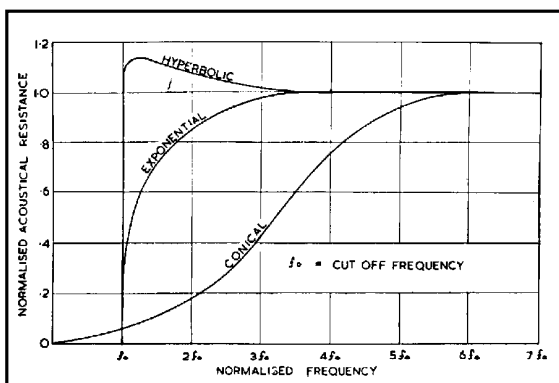
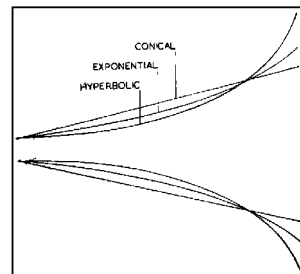
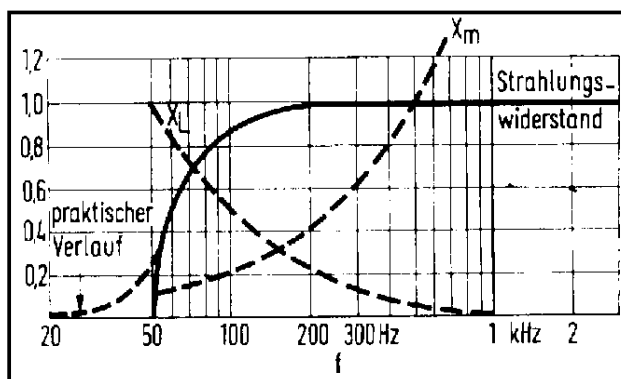


Bild 101 / 102 Frequenzgang des Strahlungswiderstandes



Frequenzgang der Strahlungsimpedanz (Exponentialhorn)

5.1.2 Richtcharakteristik von Hornlautsprechern

Bei einem richtig konzipierten Horn findet eine gleichphasige Schallabstrahlung auf der ganzen Fläche der Trichteröffnung statt. Die Schallabstrahlung entspricht damit der eines direktstrahlenden Lautsprechers, dessen Membranfläche gleich gross ist wie die Trichteröffnung. Durch eine geeignete Formgebung der Trichteröffnung kann so eine vorgegebene Richtcharakteristik realisiert werden.

5.2 Horntreiber

In Kombination mit Hörnern werden, zumindest im Mittel- und Hochtonbereich, nicht normale Membranlautsprecher, sondern sogenannte Druckkammer-Treiber verwendet:

Wenn zwischen die Membran des Treibers und den Hornmund eine Druckkammer eingesetzt wird, findet eine schnelle-Transformation statt. Dadurch wird die Strahlungsleistung zusätzlich verbessert.

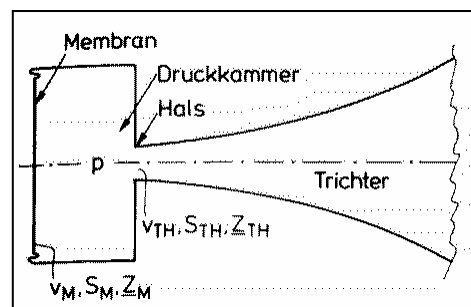


Bild 103

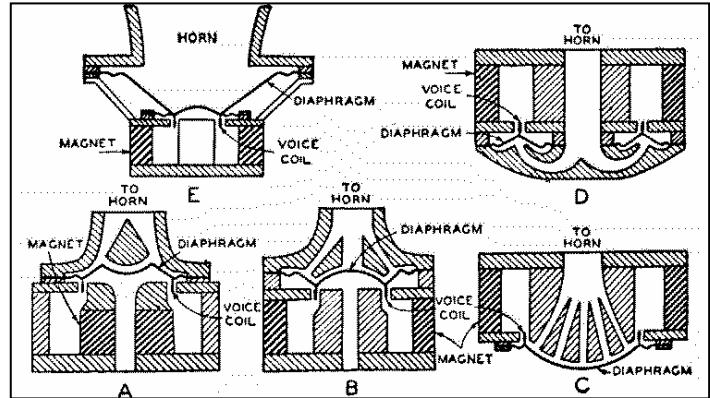
Das Produkt aus Membranfläche A_M und der Schnelle v_M der Membranbewegung ist gleich dem Produkt aus der Fläche der Druckkammeröffnung A_D und der Schnelle v_D .

$$A_M \cdot v_M = A_D \cdot v_D$$

Für die Schallschnelle am Trichterhals gilt:

Bild 104

$$v_D = (A_M / A_D) \cdot v_M$$



Beispiel:

Druckkammer mit einer Membranfläche von $A_M = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, einer Membranschnelle von $v_{2\text{Meff}} = 0.5 \text{ m/s}$ und einer Austrittsfläche von $A_D = 104 \text{ m}^2$

Mit den obigen Werten gilt für die Leistung der Membran:

$$P_M = A_M \cdot \Delta L \cdot c \cdot v_{2\text{Meff}} = 0.21 \text{ Watt}$$

Die Schnelle am Ort der Druckkammeröffnung:

$$v_D = 10 \text{ m/s}$$

Und die Leistung: $P_D = 4.2 \text{ W}$

5.3 Berechnung von Exponential-Hörner

Es gilt:

$$A_M > \lambda^2 / 4\pi \text{ und } A_x = A_H \cdot e^{kx}$$

- λ Wellenlänge des tiefsten Tones
- A_x Flächenquerschnitt im Abstand x (m^2)
- A_H Flächenquerschnitt des Halses
- k Hornkonstante (Öffnungsmass)
- x Entfernung vom Trichterhals

Ein Horn verhält sich wie ein akustischer Hochpass.

Für die untere Grenzfrequenz gilt:

$$f_g = (k \cdot c) / 4\pi$$

Wenn die Halsfläche A_x und die Fläche der Trichteröffnung bekannt sind, gilt für die Trichterlänge:

$$A_M / A_H = A_x / A_H = e^{kx}$$

$$x = \ln(A_x / A_H) / k$$

$$k = 4\pi / \lambda_g = (4\pi \cdot f_g) / c$$

Beispiel 1

Es soll ein Tiefton-Horn mit einer unteren Grenzfrequenz von $f_g = 60 \text{ Hz}$ berechnet werden, das mit einem dynamischen Lautsprecher von 25 cm Durchmesser betrieben wird.

$$A_H = \pi r^2 = 0.049 \text{ m}^2$$

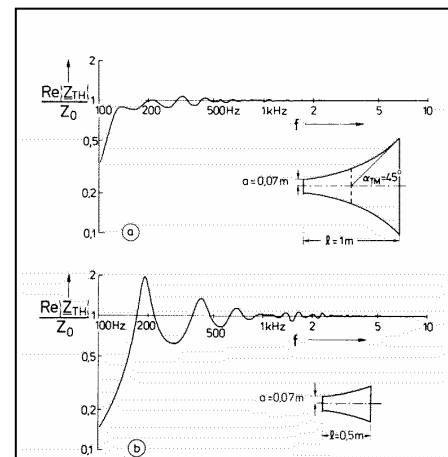
$$A_M = \lambda^2 / 2 = c^2 / (4\pi \cdot f^2) = 1.88 \text{ m}^2$$

$$k = (4\pi \cdot f_g) / c = 2.21 \text{ m}^{-1}$$

$$e^{kx} = 0.93 / 0.049 = 19$$

$$kx = 2.94$$

$$x = 2.94 / 2.21 = 1.33 \text{ m}$$



Beispiel 2

Mittel-Hochtonform mit einer unteren Grenzfrequenz von $f_g = 300$ Hz. Die Fläche der Halsöffnung beträgt

$$A_H = 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Entsprechend dem obigen Beispiel ausgerechnet ergibt sich:

$$k = 11.08 \text{ m}^{-1}$$

$$A_M = 0.057 \text{ m}^2$$

Wenn horizontal ein breiter Abstrahlwinkel realisiert werden soll, muss der Trichtermund gekrümmt sein. In diesem Fall muss der Trichtermund die doppelte Fläche haben ($A_M = 0.114 \text{ m}^2$).

In diesem Fall gilt:

$$e^{kx} = 363 \quad kx = 5.89 \quad x = 0.53 \text{ m}$$

5.4 Probleme mit realen Hörnern

5.4.1 untere Grenzfrequenz und Strahlungswiderstand

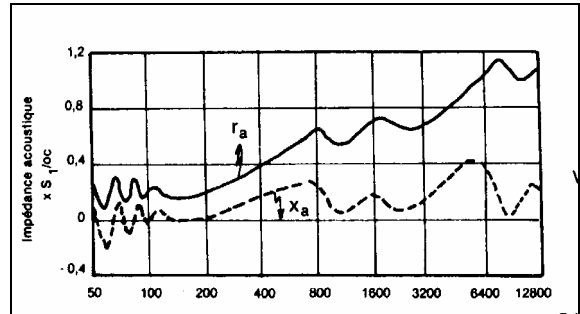
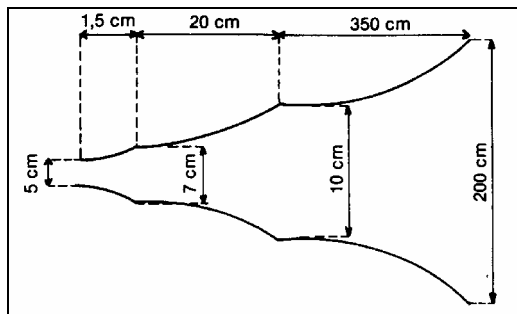


Bild 106, 107

5.4.2 Ausbreitung des Schalls im Horn

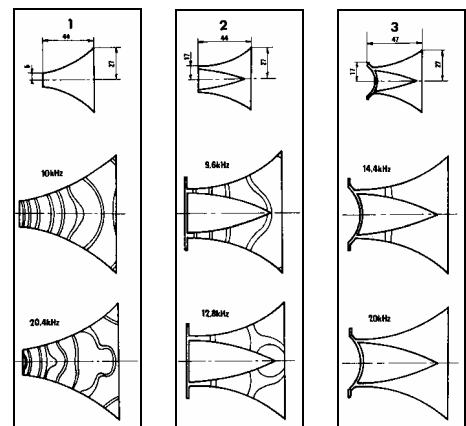
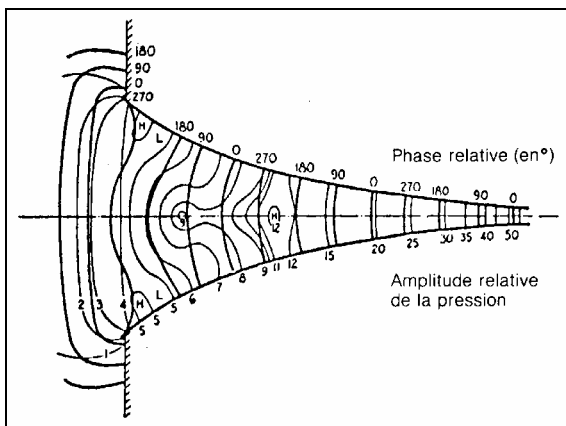


Bild 108 - 111

5.4.3 Reflexionen an der Hornöffnung

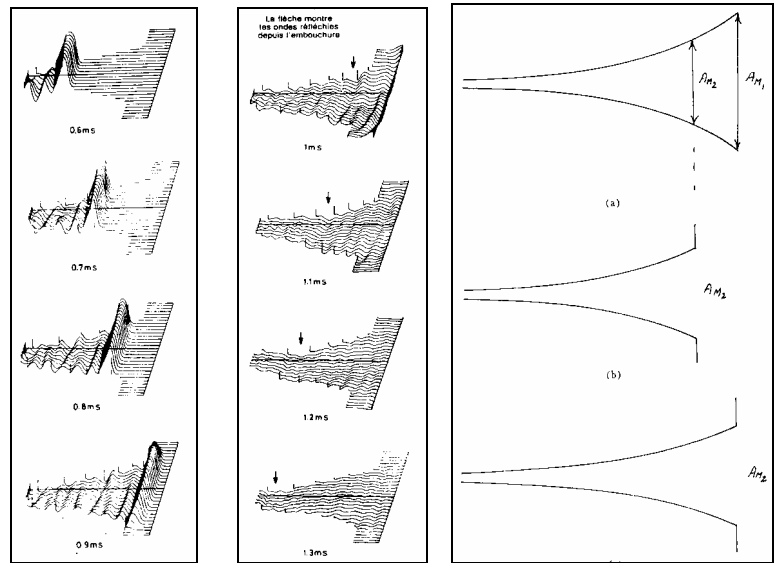


Bild 112 - 114

5.5 Praktische Ausführungen

5.5.1 Breitbandhörner (für den Einbau von Breitbandlautsprechern)

In den auf dieser und der folgenden Seite gezeigten Exponentialhörnern müssen Chassis mit einer zwischen 30 Hz und 70 Hz liegenden Resonanzfrequenz eingebaut werden. Chassis, die üblicherweise in geschlossenen Gehäusen eingebaut werden (tief liegende Resonanzfrequenz) sind nicht geeignet.

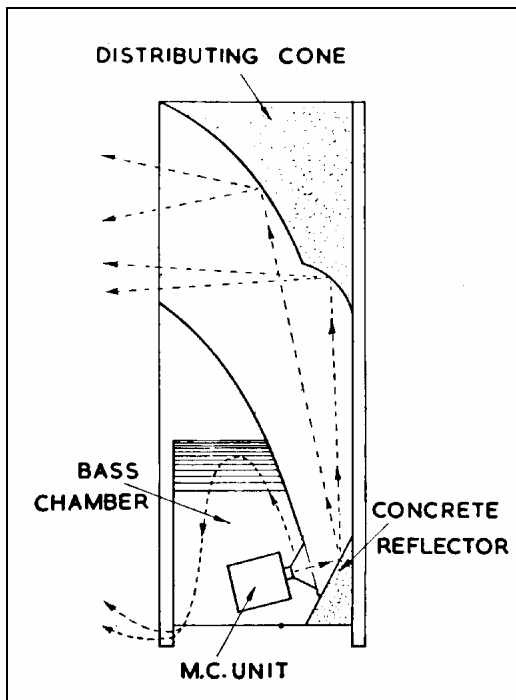
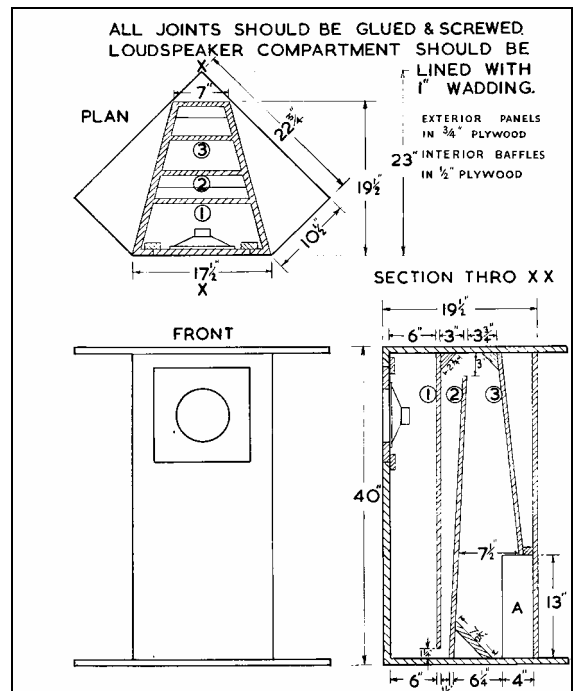


Bild 115, 116 Breitbandhorn von Voigt (Dreissigerjahre)



Tiefhorn für den Einbau eines Breitbandlautsprechers

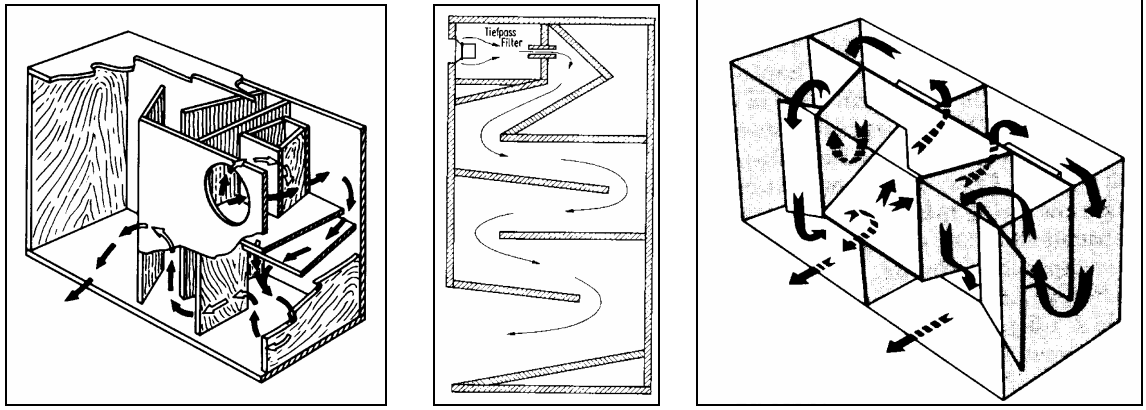


Bild 117 - 119

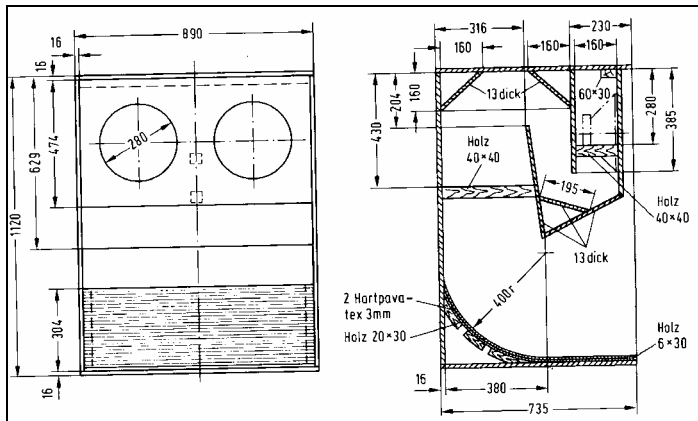
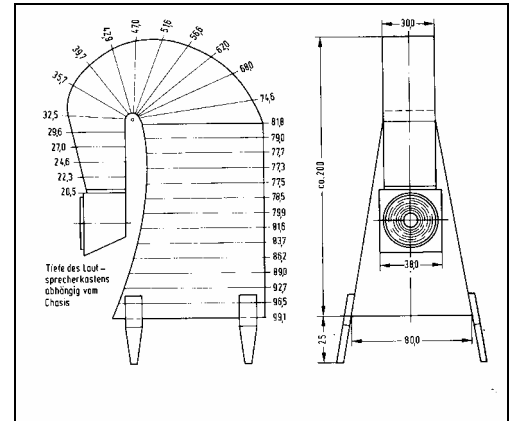


Bild 120, 121 Horn für Popmusik von JBL



Dinosaurierhorn

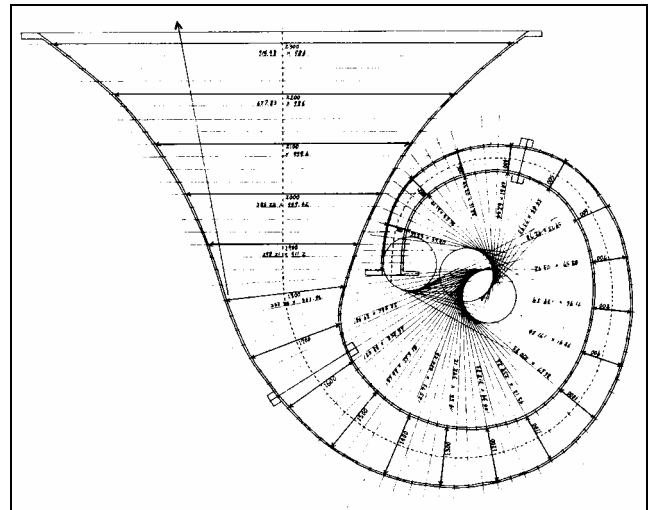
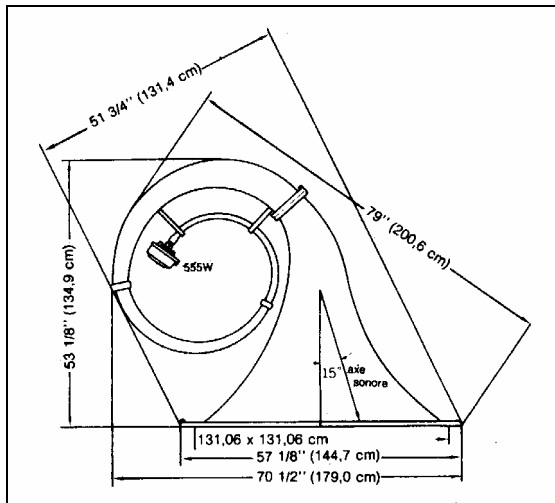
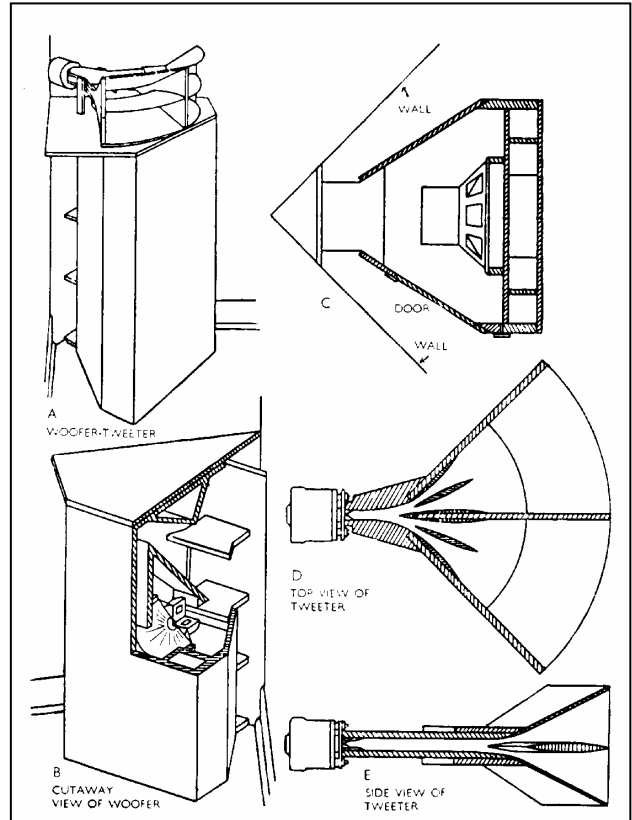


Bild 122, 123

Tieftonhorn von Klipsch

Das Klipsch-Horn (Markenname "Klipschorn") wird seit den früheren Sechzigerjahren unverändert gebaut. Es ist heute noch auf dem Markt.

Das Tieftonchassis ist intern in einem geschlossenen Gehäuse eingebaut. Die Chassisparameter werden wie bei einer geschlossenen Box durch das Luftpolster in diesem Gehäuse so modifiziert, dass die Einheit Chassis – geschlossenes Gehäuse – Exponentialhorn die gewünschten Eigenschaften hat. Die Raumbegrenzungsflächen bilden die "Fortsetzung" des Horns (Bild 124).



5.5.2 Mittel- und Hochtonhörner

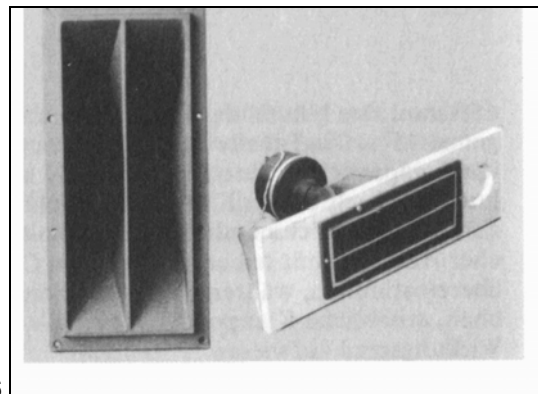
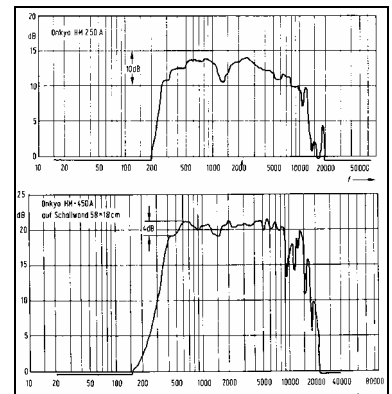


Bild 125, 126

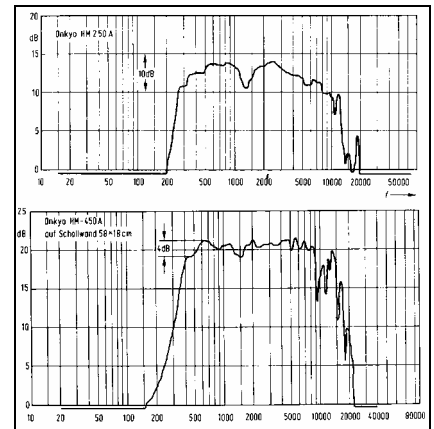
Mittel-Hochtonhörner von ONKYO Links : HM250A, rechts HM450A



Oben HM 250A, unten HM450A



Bild 127, 128 Diffractionschorn von JBL



Frequenzgang des Diffractionschorns

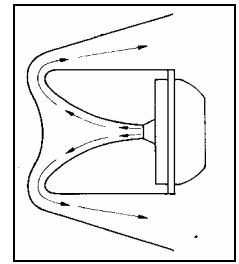
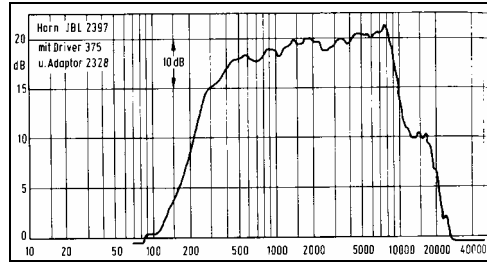
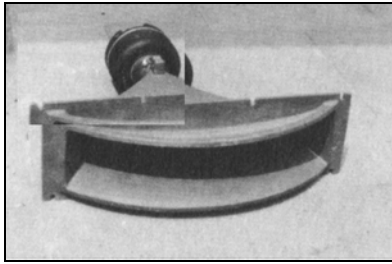
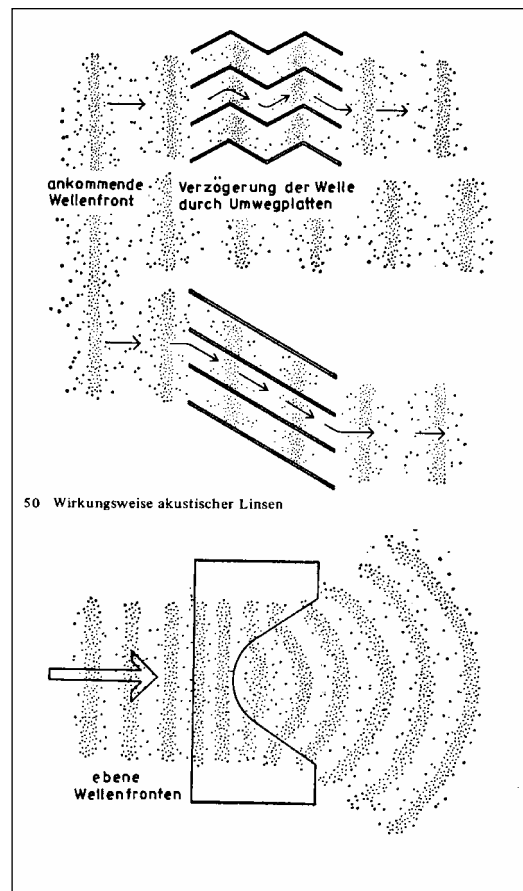


Bild 129 – 131 Mittelhochtonhorn JBL 2385

elektroakustisches Megafon

5.6 akustische Linsen

Bild 132



6. Lautsprecher in kleinen Räumen

6.1 Schallquelleneigenschaften der Lautsprecher

6.1.1 Monopol

Konventionelle Lautsprecherboxen werden in der Regel als Zwei- oder Dreiwegsysteme realisiert. Der Tieftonbereich wird von einem Tieftonchassis mit einem Durchmesser von 13 cm und 28 cm ungerichtet (kugelförmig) abgestrahlt. Das Lautsprechergehäuse dient dabei als Schallführung (geschlossene Box, Bassreflexgehäuse, Horn, Transmission Line, etc.).

Für die Wiedergabe des Mittel- und Hochtonbereichs werden Konus-, Kalotten- oder Bändchenlautsprecher eingesetzt. Im Gegensatz zum Tieftonbereich geschieht die Schallabstrahlung gerichtet. Ideal ist eine gleichmässige Schallabstrahlung im vorderen Halbraum.

In der Praxis sind die Richtcharakteristika von Mittel- und Hochtonlautsprechern deutlich frequenzabhängig.

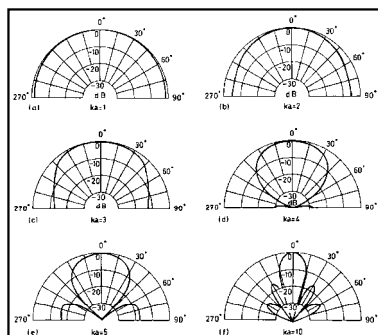
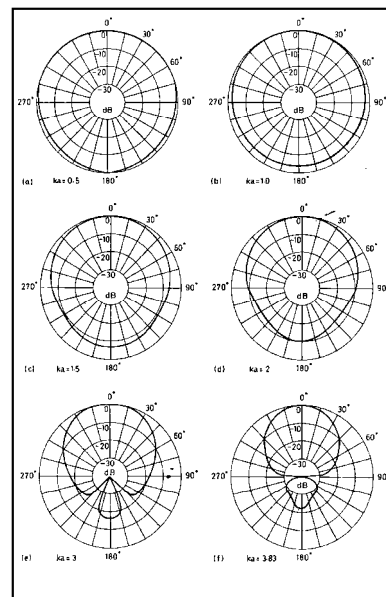


Bild 133, 134 vor einer Wand aufgestellter Monopol



freistehender Monopol

6.1.2 Dipol

1. Version

Grossflächige Membransysteme (Elektrostaten oder Magnetostaten) ohne zusätzliche Schallführung.

Membranvorder- und Membranrückseite strahlen den Schall gegenphasig in den Raum ab. Die Richtcharakteristik ist achterförmig.

2. Version

Der Dipolstrahler mit konventionellen, in Schallführungen eingebauten Chassis:

Eine zweite Kombination von Tiefton- Mittelton- und Hochtonchassis wird auf der Gehäuserückseite eingebaut und verpolt angesteuert. Das Resultat ist eine konventionelle Lautsprecherbox mit achterförmiger Richtcharakteristik.

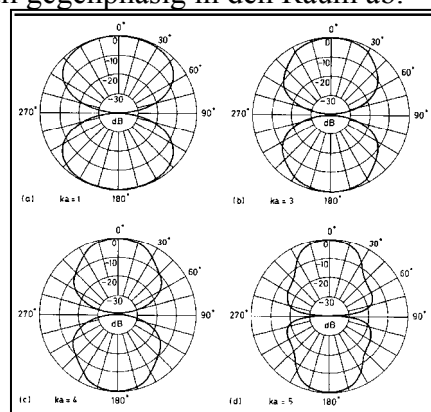


Bild 135

6.1.3 Bipol

Bipolstrahler unterscheiden sich äusserlich und im Aufbau nicht von der oben beschriebenen 2. Version der Dipolstrahler. Die Chassis auf der Vorder und der Rückseite des Gehäuses werden aber gleichphasig angesteuert.

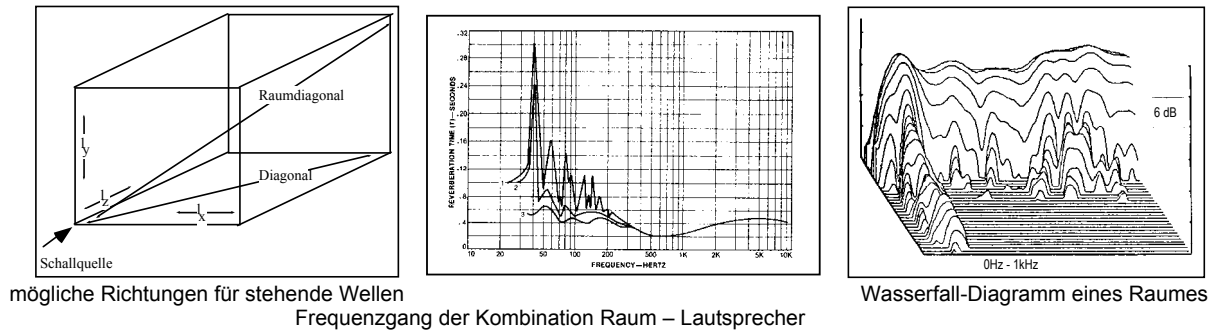
Die Richtcharakteristik ist kugelförmig.

Beim Bipol handelt es sich im Prinzip um einen optimalen Monopol mit frequenzunabhängiger Richtcharakteristik.

6.2 Akustische Eigenheiten der Wiedergaberäume

6.2.1 Raumresonanzen

Bild 136 - 138



6.3.1 Einfluss des Raumwinkels auf den Tieftonfrequenzgang

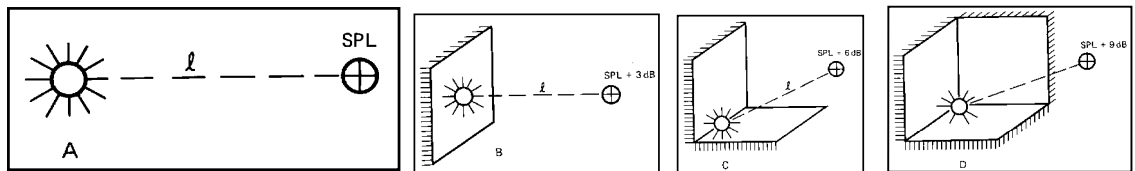


Bild 139 - 142

6.3.2 Aufstellungsabhängiger Raumeinfluss auf den Frequenzgang

gilt nur für System 2.Ordnung mit 12 dB/Oktav Abfall unterhalb der Resonanzfrequenz (closed Box)

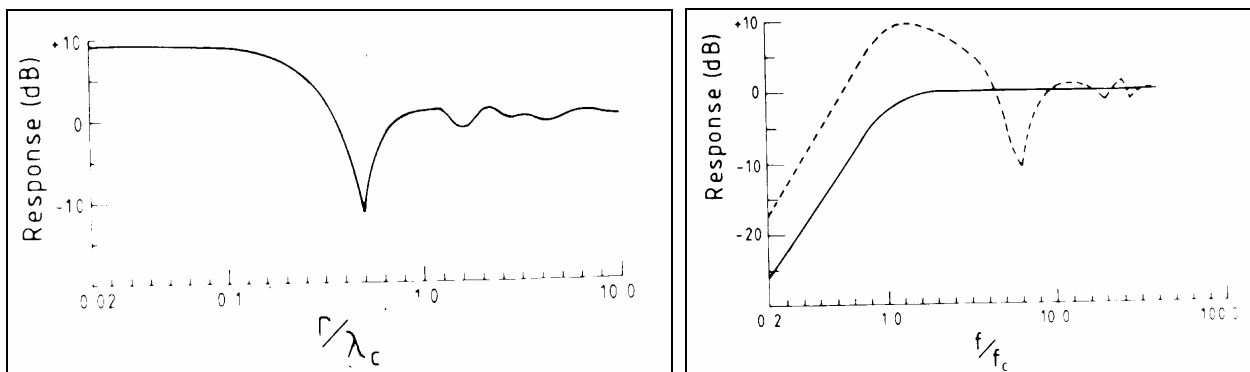


Bild 143, 144 Frequenzgang bei einem Abstand von $r/\lambda_c = 0.08$

Frequenzgang bei einem Abstand von $r/\lambda_c = 0.08$

max. Abweichungen vom geradlinigen Frequenzgang

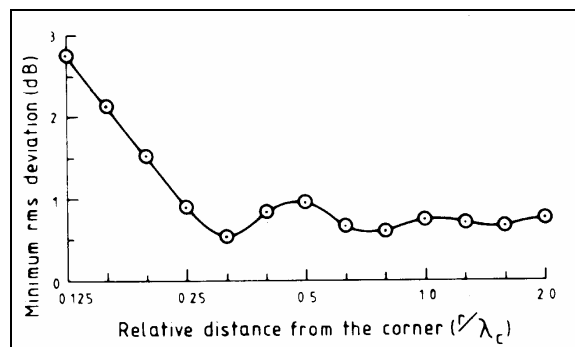


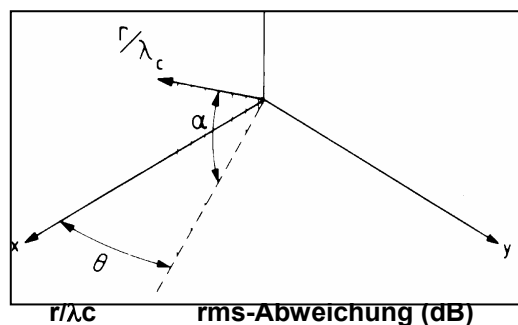
Bild 145

6.3.3 Q-Wert des Lautsprechers und Aufstellungsposition

Rahmenbedingung

- System 2. Ordnung
- Abstand des Lautsprechers von der nächsten Raumbegrenzungsfläche mindestens $0.6 \lambda_c$

Bild 146



Lautsprecher-Q	θ	α	r/λ_c	rms-Abweichung (dB)
1.414	40°	25°	0.4	1.31
1	25°	30°	0.4	0.71
optimal 0.707	20°	30°	0.315	0.8
0.5	30°	15°	0.2	0.98

Raumkoordinaten der optimalen Plazierungen

Fc (Resonanzfrequenz)	30	40	50	60	70	80	90	100 Hz
min Abstand von nächster Begrenzungsfläche (cm)	720	540	432	360	308	270	240	216 cm
D (Abstand von Ecke)	360	270	216	180	154	135	120	108 cm
x (Abstand von Frontwand)	107	80	64	53	45	40	35	32 cm
y (Abstand von Seitenwand)	180	135	108	90	77	67	60	54 cm
z (Höhe über Boden)	293	220	176	147	125	110	98	87

Anhang

A1 Demo-CD 5 Lautsprecher

1. Stereo-Test, CD-Format

Phasentest

(1) in phase – out of phase – in phase

Tiefenwiedergabe

(2) 20 Hz:	100 – 20 – 100 Hz	(6) 60 Hz:	100 – 60 -100Hz
(3) 30 Hz:	100 – 30 – 100 Hz	(7) 70 Hz:	100 - 70– 100Hz
(4) 40 Hz:	100 – 40 – 100 Hz	(8) 80 Hz:	100 - 80– 100Hz
(5) 50 Hz:	100 – 50 – 100 Hz	(9) sweep	30 Hz – 350 Hz

Frequenzgang und Klangbalance

(10) sweep 20 Hz – 10 kHz
 (11) Oktavrauschen, 6 Bänder
 (12) Terzrauschen, 14 Bänder

pink noise 2 Bänder, Trennfrequenz 2.5 kHz mit Anhebung und Absenkung des Hochtonbandes
 Signale zum Test der Balance Tief/Mittelton- und Hochtonbereich einesZweiwegsystem mit ent-
 sprechender Frequenzweiche.

(13) 4 dB	(17) -4 dB
(14) 2 dB	(18) -6 dB
(15) linear	(19) -8 dB
(16) -2 dB	(20) -10 dB

Sinatra/Basie 2 Bänder Trennfrequenz 2.5 kHz mit Absenkung des Hochtonbandes
 Musikbeispiel zum Test der Balance Tief/Mittelton- und Hochtonbereich einesZweiwegsystem mit
 entsprechender Frequenzweiche.

(21) linear
 (22) -2 dB
 (23) -4 dB

Musikbeispiele

(24) Hammond-Organ	(28) Oper Ausschnitt „Roi Pausole“
(25) Sinfonieorchester Wagner: Tristan 3. Akt, Vorspiel	(29) Sinfonieorchester, Produktion „Entspannungsmusik“
(26) Jazztrio Klavier, Schlagzeug, Bass	(30) Techno
(27) Big Band mit Sänger Count Basie und Frank Sinatra	

2. Surround 5.1, dts-Format

Zuordnung der Kanäle

(31) Gegen-Uhrzeigersinn, beginnend mit right front

Phasentest

Beispiele "in phase – out of phase – in phase"

(32) left front – right front

(33) left front –center

(34) left front – left surround

(35) left surround – right surround

Musikbeispiele

(36) grosses Sinfonieorchester in Konzertsaal, Mitschnitt (OSIS 321)
Strawinsky: Sacre du printemps, Orchester der HMT Zürich

(37) Klavier, Produktion Jean-Paul Brodbeck (spezial surround)

(38) Hammond-Orgel, spezial-surround (spezial surround)

