

Allgemeines Vorwort

Vielleicht lesen Sie dieses Handbuch mit der Absicht, in näherer oder fernerer Zukunft Lautsprecher selber zu bauen, Sie sind jedoch noch skeptisch hinsichtlich des Erfolgs.

Ein und für alle mal.

Es gibt keinen Grund, weshalb der Selbstbau einer Box Ihnen nicht gelingen sollte,

- a) weil es sich um keine Geheimwissenschaft handelt, sondern um einfache physikalische Gesetze
- b) weil wir Ihnen dabei helfen.

Wollen Sie auf b) nicht zurückgreifen, so sollten Ihnen allerdings die unter a) genannten physikalischen Grundlagen, wenn nicht geläufig, so doch verfügbar sein. **Denn der einzige Grund, weshalb ein Selbstbau nicht funktionieren könnte, ist das Ignorieren dieser fundamentalen Prinzipien.**

Um Ihnen das Warten in Bibliotheken zu ersparen, haben wir Ihnen in dieser Broschüre die wesentlichen Grundsätze Kapitel für Kapitel versucht zu erläutern. Insbesondere sind wir hierbei häufig vernachlässigte Aspekte und Zusammenhänge eingegangen.

Dritte Auflage 1984

RÖMER-VERLAG

Alle Rechte vorbehalten, Abdruckgenehmigung und sonstige Vervielfältigung, insbesondere auf elektronischen Weg, auch für Teile des Inhalts, nur durch den Verlag

Satz: Lehne — Druckform- & Gesamtherstellung, Götz Schwamkrug
Repro, Druck: Westarp, Mulheim/R
Idee: Reiner E. Römer, M. A. E. S
Text,
Zeichnungen,
Fotos R. Römer, G. Schwamkrug

RÖMER AUDIO EQUIPMENT GmbH

Inhalt

Vorwort	3
Allgemeines zur Lautsprecher- technik	
Schachmatt	4
Grund-Sätze	7
Wieviele Watt ist ein Watt	7
Tuned Pipe, ist 1 = 8 ?	8
Der Hornlautsprecher	9
Der Lautsprecher im Raum oder Klangmanipulationen ⁷	10
Bass-oder was ⁷	12
Meßgerät Ohr	13
Flotenklänge	14
Begriffe der Lautsprechertechnik und deren Notation	15
Berechnungsgrundlagen	
Gehäusematerial	16
Geschlossene Box	17
Baßreflexprinzip ..	18
Transmission Line	23
Mischformen	27
Dämmstoffe	25
Hornlautsprecher	26
Elektrostatische Lautsprecher	33
Echte Bandchen	35
Gegenkopplung	36
Frequenzweiche	38
Pegelabsenkung	40
Weichenbauteile	40
Synthese	42
Superhoctoner sinnvoll oder hilflos	43
Aktives	44
Die speziellen Lautsprecherprodukte	
Podszus Gorlich	45
Shackman Elektrostaten	47
Harbeth	50
Lowther - Korrekturen	53
Radialmitteltonhorer	
Die ZD-Serie	54
Focal Kalotte T 120	55
Focal Lautsprecherboxen	55
MB Suprnylkalotte	58
KEF-Bausätze	59
Dynaudio	62
Wharfedale	64
Technische Daten der Chassis	65

Vorwort zur dritten Auflage

Lieber Musikfreund

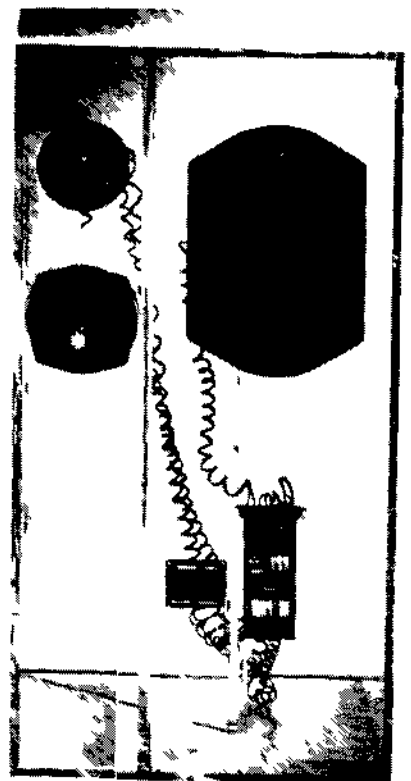
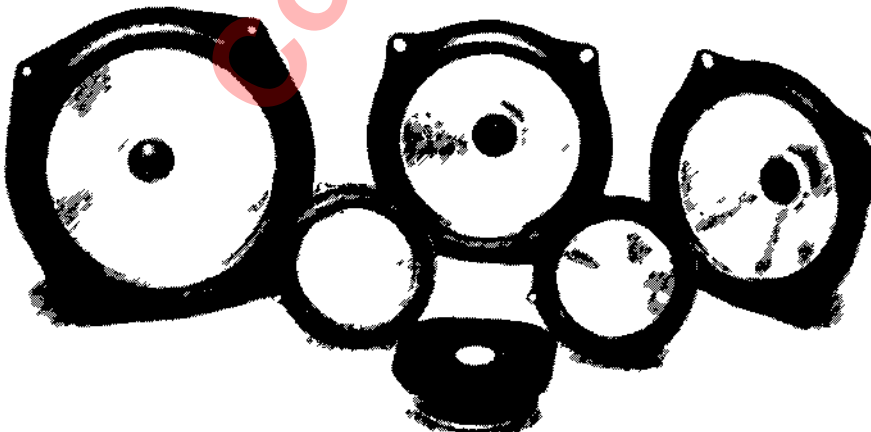
Dieses Lautsprecherhandbuch ist mittlerweile in der dritten Auflage erschienen. Lob und Kritik sind Grund genug für einige Vorabemerkungen.

Die technische Entwicklung der meisten HiFi-Geräte hat in der jüngeren Vergangenheit einen erstaunlichen Sprung geschafft. Waren noch vor wenigen Jahren gute und beste Meßergebnisse keine Garantie für guten Klang, so ist da heute einiges anders. Bessere Meßverfahren (TIM Messungen sind davon nur ein Bruchteil), rechnerunterstützte Entwicklungen (seit langem möglich, nur früher selten finanziert) und die ewige Schlechtmacherei einiger HiFi-Enthusiasten (egal wie teuer das Ding ist, es klingt einfach nicht) haben dafür gesorgt, daß selbst preiswerte Komponenten heute klanglich hinter den Insider-Tips der 70er Jahre nicht zurückstehen müssen. Was natürlich nicht ausschließt, daß heute einige Profis Verstärker herstellen, deren tatsächliche Klang-Qualität überhaupt noch nicht meßbar ist.

Angesichts dieser Entwicklung ist es doch überaus schade, wenn der Qualitätsgewinn am Verstärkerausgang steckenbleibt. Um optimale Wiedergabe zu realisieren, muß zwischen den einzelnen Komponenten der Wiedergabekette ein bestimmtes Gleichgewicht bestehen. Den Lautsprecherboxen kommt in diesem Zusammenhang eine recht große Bedeutung zu, da sie wohl den entscheidendsten Anteil am Gesamtklang der Kette haben. Unser Thema sind Lautsprecherboxen und deren Eigenarten, wir haben uns in der Vergangenheit ausschließlich diesem Thema gewidmet und werden ab Sommer '84 auch eigene Entwicklungen auf dem Elektroniksektor vorstellen. Diese Idee, aus der das Lautsprecherhandbuch nämlich entstanden ist, wird leider nie perfekt realisierbar sein, das perfekte Gleichgewicht scheidet meist an den unterschiedlichen Abhöräumen und Hörgewohnheiten (vermutlich stehen bis heute keine zwei Lautsprecherboxen irgendwo in gleichen

Räumen auf gleichen Positionen), andererseits können die erzielbaren Ergebnisse trotzdem mehr als befriedigend sein. Dieses Handbuch soll, ebenso wie die vorherigen, die Funktion und die Eigenarten dieser elektroakustischen Wandler erläutern, und damit dem interessierten Leser die Annäherung an die Perfektion erleichtern. So ist zum Beispiel der klangliche Unterschied zwischen dynamischen Schwingspulenlautsprechern (Membran- oder Kalottensystemen) und elektrostatistischen Lautsprechern durch Meßwerte nicht im geringsten zu beschreiben. Die Kenntnis der Funktion ermöglicht erheblich einfachere Rückschlüsse auf die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Wandler. Auch die Probleme der Kombination von Lautsprecherbox und Raum werden in Begleitung werbender oder bewertender Information recht selten angesprochen, auch hier sind einige Kenntnisse vorher nützlicher als einige Erfahrungen. Dieses Handbuch soll nicht alle Probleme rund um den Lautsprecher lösen, es soll zum Fragen und Nachdenken anregen, um Enttäuschungen zu vermeiden. Die Physik des Lautsprechers ist nicht so kompliziert, wie hier und da behauptet wird, und sie ist ein nützliches Hilfsmittel, weil sie sich eben von keinem überlisten läßt.

Römer Audio Equipment GmbH
Adalbertsteinweg 253
5100 Aachen



Allgemeines zur Lautsprechertechnik

Schachmatt?

Ein Spiel mit 32 Figuren auf 64 Feldern mit sehr einfachen Spielregeln kann auch die besten Rechnersysteme vor unlösbare Probleme stellen, da durch die Kombinationsmöglichkeiten die anfangs klaren Verhältnisse sehr schnell etwas komplizierter werden.

Die Kombination aller Figuren eines Spieles ergibt ein System, die Wirksamkeit dieses Systems zeigt sich darin, ob und wie sehr es dem gegnerischen System überlegen ist.

Bei der Entwicklung einer Lautsprecherkombination sind die Verhältnisse ähnlich. Zu Beginn stehen die positiven (Spieler) und negativen (Gegenspieler) Eigenschaften aller Bauteile fest, wobei jedes Bauteil positive, also erwünschte, und negative, also unerwünschte, Eigenschaften hat. Eine leichte Membran bei einem Baßlautsprecher hat ein besseres Impulsverhalten (erwünschte) als eine schwere, erfordert aber aus physikalischen Gründen eine sehr viel größere Gehäuse (unerwünscht), um den gleichen Tiefbaß zu erzielen. Bauteile der Frequenzweiche erzeugen Phasenverschiebungen; ein Tief-, Mittel- oder Hochtonlautsprecher, der bis zu seiner Resonanzfrequenz herab linear Schalldruck abgibt, ist aus genau diesem Grund nicht phasenlinear, die Beispiele lassen sich beliebig fortsetzen.

Beim Schachspiel ist es möglich, daß ein Spieler bis auf den König alle, der andere keine Figuren verliert, ebenso ist es möglich, alle Figuren bis auf eine vom Brett zu spielen oder dazwischen zu einer, für beide Seiten ausweglosen, Pattsituation zu gelangen. Entscheidend hierfür ist die Kenntnis und deren Auswirkungen, die die eigene Kombination bestimmen.

Ebenso müssen bei einer Lautsprecherkombination die nachteiligen Eigenschaften (Kombination und Drohung des Gegners) aller Bauteile berücksichtigt werden, da andernfalls die Wirkung der Nachteile sehr viel größer sein kann als die der angestrebten Vorteile!

Die besten Bauteile allein bieten daher nicht die geringste Garantie dafür, daß die Kombination ebenfalls hervorragend wird.

Sie sind allerdings eine unerläßliche Voraussetzung für eine hervorragende Kombination, da sich die nachteiligen Eigenschaften in zwei Gruppen aufteilen lassen.

1. Die Nachteile der ersten Gruppe sind von den verwendeten Bauteilen direkt abhängig: Impulsverhalten (Transient Response) der Lautsprecher, Ohmsche Widerstände der Frequenzweichteile (Leistungsverluste und Veränderung des Ausschwingverhaltens der angeschlossenen Lautsprecher) Stabilität und Resonanzfreiheit des Gehäuses (Verfärbungen) usw.

2. Die Nachteile der zweiten Gruppe sind eine Folge physikalischer Gegebenheiten und gelten für alle Bauteile unabhängig von den vor- oder nachteiligen Eigenschaften der ersten Gruppe. Hierzu gehört, in erster Linie, das Amplituden-Phasenverhalten der Lautsprecher und der Frequenzweichen. Zwei Signale gleicher Amplitude und entgegengesetzter Phasenlage löschen sich aus, bei gleicher Phasenlage verstärken sie sich.

Abhängig von der Anordnung der Lautsprecher und dem Abstand der Übergangsfrequenzen zu den Resonanzfrequenzen der Lautsprecher werden Phasendrehungen (Verschiebungen) erzeugt, die Größenanordnungen sind errechenbar und nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund sollten die Schwingspulen aller Lautsprecher in einer Ebene senkrecht übereinander in Ohrhöhe liegen und Mittel- und Hochtonlautsprecher mindestens eine Oktave oberhalb ihrer Resonanzfrequenz eingesetzt werden. Je linearer der Schalldruckverlauf zur Resonanzfrequenz hin ist, um so steiler werden die Phasendrehungen in diesem Bereich, durch den linearen Frequenzgang werden vom Lautsprecher Signale mit falscher Phasenlage aber voller Amplitude ausgestrahlt!

Diese Phasenfehler sind eine Ursache dafür, daß eine Frequenzweiche mit angeschlossenen Lautsprechern einige, von den Berechnungen völlig abweichende Ergebnisse zeigen kann. Bei der Weichenberechnung wird davon ausgegangen, daß die Signale so abgestrahlt werden, wie sie die Weiche verlassen, nur so können sich Phasenlage und Amplitude im Übergangsbereich richtig addieren, jede zusätzliche Phasendrehung führt zwangsweise zu Amplitudenänderungen und damit zu Fehlern im Schalldruckverlauf!

Je geringer der Abstand der Übergangsfrequenz von der Resonanzfrequenz ist, um so größer werden diese Fehler. Ebenso sind diese Fehler natürlich von der Flankensteilheit (Sperrwirkung) der Weiche abhängig, da ein falsches Signal umso weniger Schaden anrichten kann, je stärker es abgeschwächt wird.

Aus diesem Grund sind 6 dB Weichen, die rechnerisch als einzige hervorragende Phasen- und Amplitudenübertragung ermöglichen, in der Praxis sehr selten erfolgversprechend.

Dieser Punkt kann besonders beim Einsatz von Lautsprechern mit 6 dB Bandpässen zur Weichenoptimierung (Filier Driver System, s. Kap. Weichen) nicht vernachlässigt werden, nur hervorragende Breitbandsysteme sind dieser Aufgabe gewachsen. Die Übergangsfrequenz sollte mindestens drei Oktaven über der Resonanzfrequenz liegen, der Schalldruckverlauf über drei Oktaven oberhalb Übergangsfrequenz linear sein.

Ein weiterer Nachteil aller dynamischen Membranlautsprecher ist die Frequenzabhängigkeit der Impedanz. Ein 8 Ohm Lautsprecher hat bei seiner Resonanzfrequenz sowie im Hochtonbereich eine sehr viel höhere Impedanz. Da aber die Impedanz die Grundlage der Weichenberechnung ist ergeben sich hier ebenfalls Fehler, die nur vermieden werden können, wenn diese Eigenschaften der Lautsprecher in die Weichenberechnung aufgenommen wird. Auch hier sind 6 dB Weichen eine riskante Lösung, ein Kalottenhochtöner mit einem sehr starken Antrieb wird zum Beispiel als Folge der Impedanzüberhöhung bei seiner Resonanzfrequenz (Beispiel 1700 Hz) bei dieser Frequenz mit ca. halber Lautstärke arbeiten, obwohl er an eine 6 dB Weiche mit einer Übergangsfrequenz von 7000 Hz angeschlossen ist!

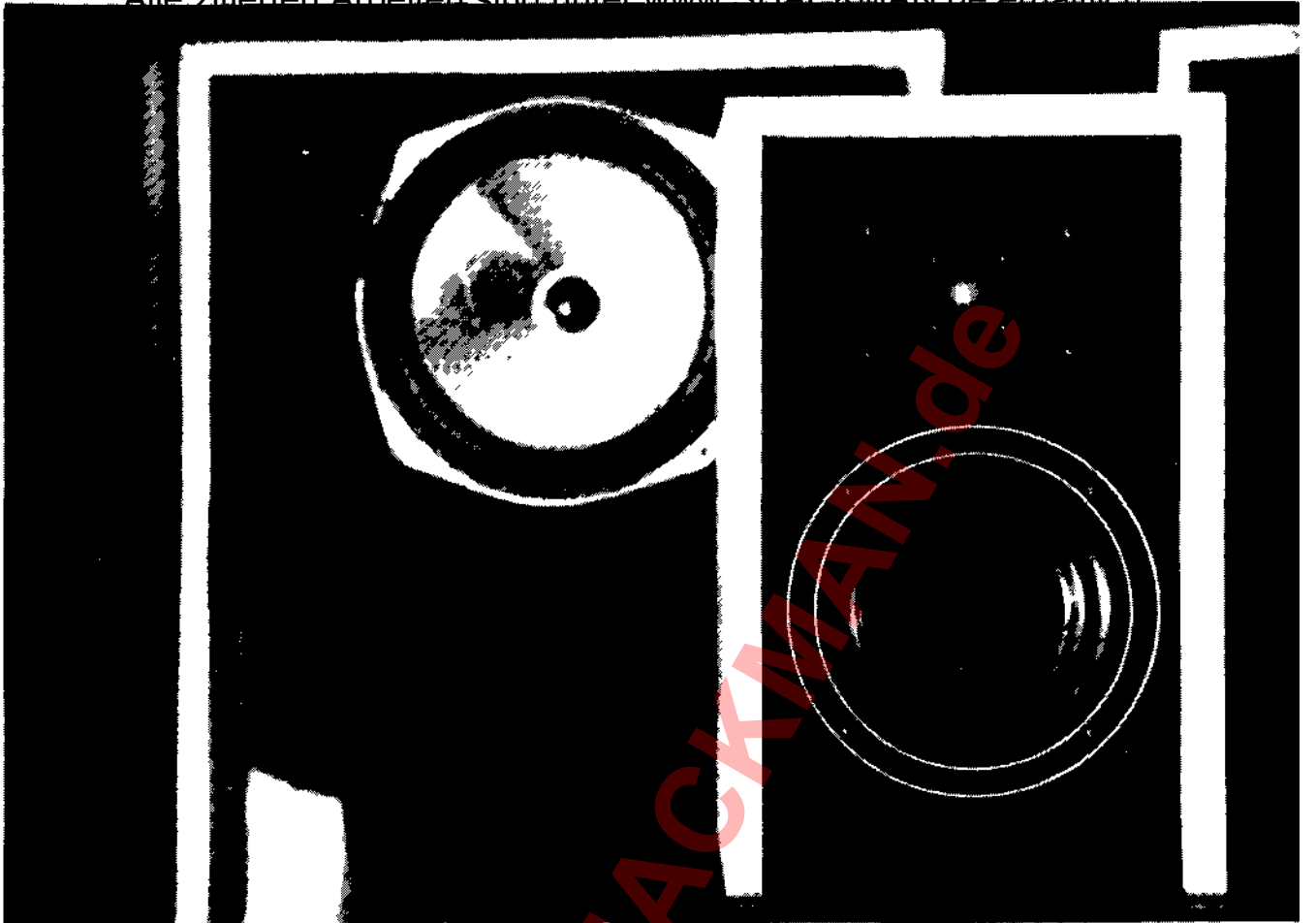
Widerstand der Weiche bei 1700 Hz 32 Ohm, Impedanz des Lautsprechers bei Resonanzfrequenz ca. 30 Ohm, Ergebnis: Abschwächung 3 dB, Phasendrehung bei Resonanzfrequenz 90 Grad + (voreilend), das klangliche Ergebnis läßt sich ahnen.

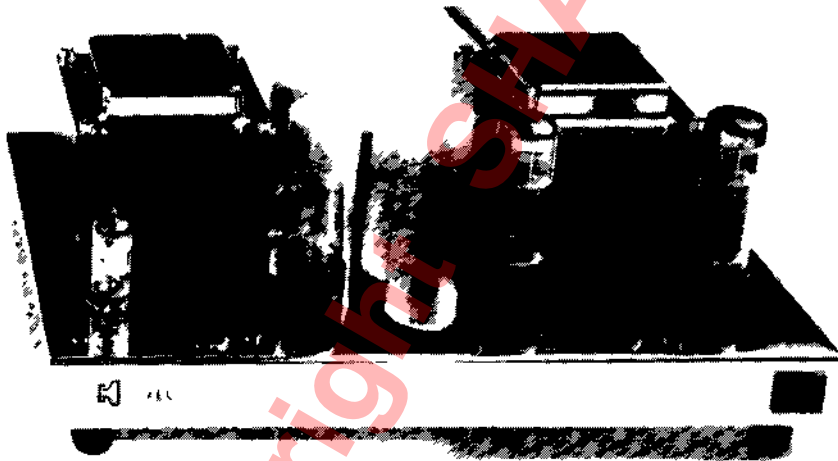
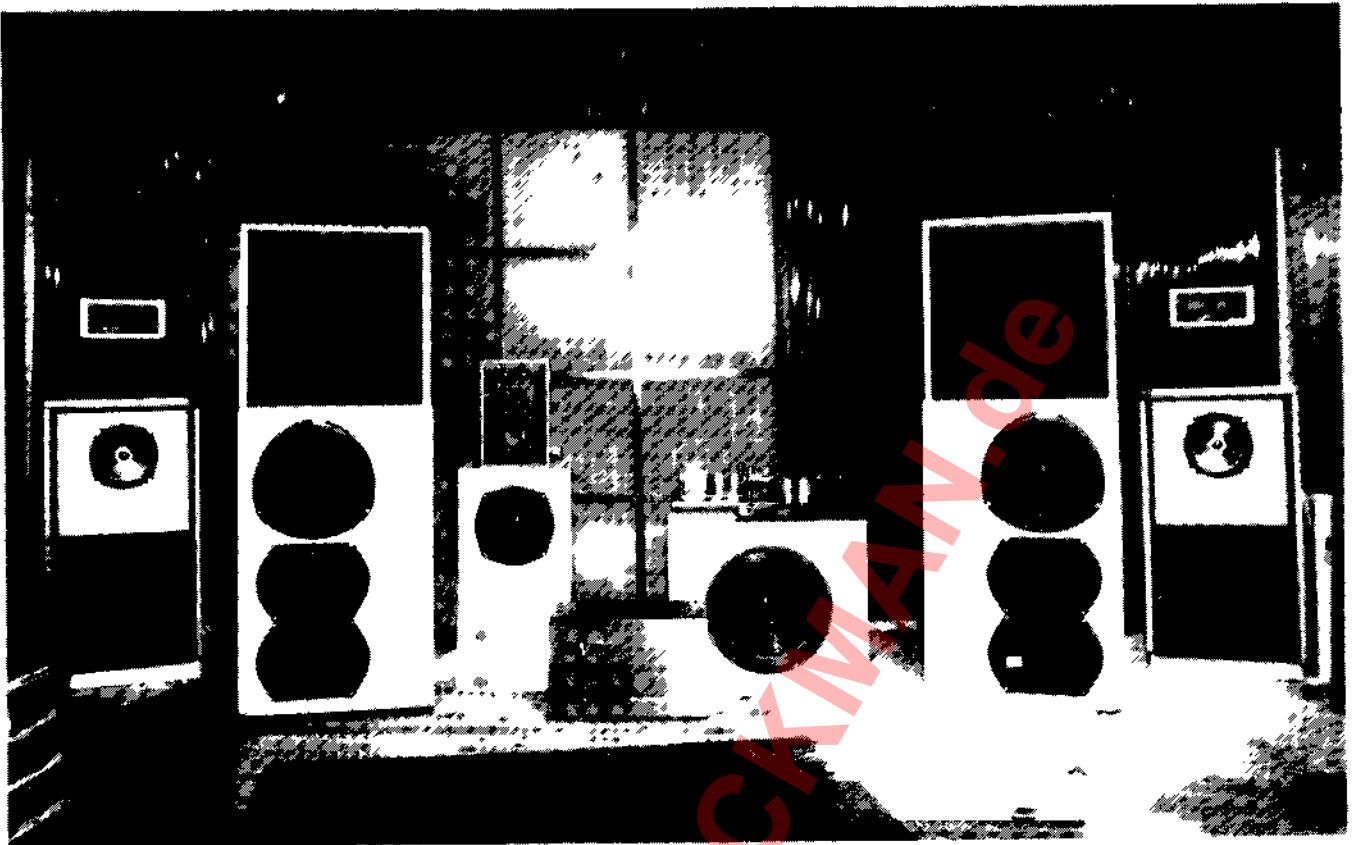
Ähnliche Probleme erzeugt der Impedanzanstieg zu den hohen Frequenzen, da ein 6 dB Weiche hier das Signal ebenfalls nicht genug abschwächen kann, in beiden Fällen wäre ein Impedanzequalizing nötig, allerdings nicht ohne Einfluß auf den Schalldruckverlauf möglich.

So kann sehr leicht aus hervorragenden Lautsprechern und einer theoretisch ebenso guten Frequenzweiche ein schlechter Klang resultieren, der durch das Gehäuse nicht besser, höchstens schlechter werden kann.

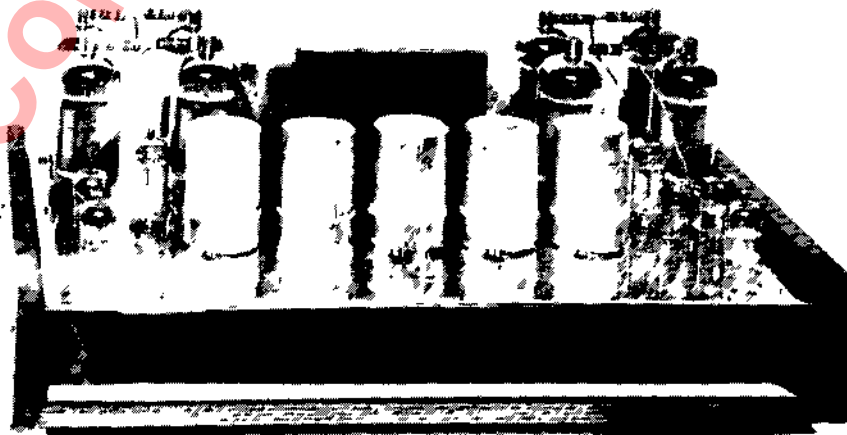
Bei genauer Kenntnis der Nachteile kann diesem entgegengewirkt werden, bei genauester Berechnung ließen sie sich mit Sicherheit vermeiden ohne auch nur eine positive Eigenschaft der verwendeten Bauteile zu verlieren, nur ist ähnlich wie beim Schachspiel die genaueste Berechnung nicht ganz einfach, eher schwierig. Die ideale Lautsprecherkombination gibt es nicht, aber es gibt sehr viele sehr gute Kombinationen. Keine davon ist ein Zufallsergebnis!!!! Gut klingende Zufallsergebnisse gibt es auch, nur die meisten könnten noch besser sein.







R A E Rohrenendstufe mit Ausgangsubertraeger



R A E Rohrenendstufe ohne Ausgangsubertraeger und Ausgangskondensator Optimaler Betrieb an 16 Ohm Boxen.

Grund - Sätze

Je kleiner ein Lautsprecher ist, um so geringer ist sein Wirkungsgrad im Baßbereich

Das gilt für alle „Mass controlled Systems“ wie geschlossene, Baßreflex und Transmissionsline Gehäuse

Auch ein kleiner Lautsprecher kann sehr tiefe Frequenzen abstrahlen, bedingt durch den schlechten Wirkungsgrad allerdings nicht sehr laut. Ist der Lautsprecher sehr klein und die untere Grenzfrequenz sehr niedrig gewählt, so hegt selbst der mit voller Verstärkerleistung zu erzielende Schalldruck bei dieser Frequenz unter der Hörschwelle' (ca 70 dB für 20 Hz). Ein Konstruktionsfehler¹ Selbst wenn dieser Extremfall in der Praxis nicht anzutreffen sein wird, gibt es Beispiele für mißlungene Kompromisse genug. Nur unter Einbeziehung der frequenzabhängigen Hörschwellenkurve (Fletcher-Munson Kurve, oder DIN 45630) ist die Suche nach dem optimalen Kompromiß zwischen Belastbarkeit, Referenzwirkungsgrad (des Lautsprechersystems im Mitteltonbereich) Gehäusegröße und unterer Grenzfrequenz erfolgversprechend.

Das Baßreflexprinzip kann die Belastbarkeit eines Lautsprechers erheblich steigern

Bei willkürlicher Wahl der Gehäusegröße oder falscher Abstimmung des Reflextunnels geht dieser Effekt verloren, gleichzeitig wird das Ausschwingverhalten hörbar schlechter (Überschwinger oder transient nging) als das des gleichen Lautsprechersystems im geschlossenen Gehäuse. Es gibt für jedes Baßlautsprechersystem nur eine optimale Reflexgehäusegröße, diese sollte vorher bekannt sein. Die Berechnung ist allerdings nicht ganz einfach, jedoch unerläßlich um den Klang hochwertiger Systeme nicht zu ruinieren (s Kap Baßreflexprinzip)

Auch mit einer geschlossenen Lautsprecherbox kann man das teuerste Lautsprechersystem ruinieren. Wenn das Gehäuse zu klein wird¹ Die Luftfedersteife des im Gehäuse eingeschlossenen Luftvolumens addiert sich zur Federsteife der Membranaufhängung, dadurch wird die Resonanzfrequenz des Lautsprechersystems aufgehoben. Mit höherer Grenzfrequenz (unterhalb der Resonanzfrequenz wird kaum noch Schall abgestrahlt) steigt auch der Wirkungsgrad des Systems bei dieser Grenzfrequenz an, wird das Gehäuse zu klein, steigt der Wirkungsgrad bei tiefen Frequenzen über den Referenzwirkungsgrad mit dem die mittleren Frequenzen abgestrahlt werden. Die tiefen Töne im Bereich der Resonanzfrequenz werden zu laut wiedergegeben, gleichzeitig verschlechtert sich das Ausschwingverhalten deutlich hörbar¹. Zwischen dem Ausschwingverhalten eines Lautsprechers und dem Schalldruck des dieser bei seiner Resonanzfrequenz erzeugt, besteht ein direkter Zusammenhang. Ein Lautsprecher mit optimiertem Ausschwingverhalten (Kritisch bedampft) wird bei seiner Resonanzfrequenz um 6 dB weniger Schalldruck erzeugen als im Mitteltonbereich, ein Lautsprecher, der ohne Schalldruckverlust bis zu seiner Resonanzfrequenz herab arbeitet,

ist unterbedampft, die Membran schwingt beim Ausschwingvorgang über ihre Ruhelage hinaus ehe die Bewegung abklingt. Die Erklärung hierfür ist einfach. Die Membranbewegung wird vom Lautsprecherantrieb (Schwingspule und Magnetfeld) kontrolliert, bei hinreichend niedriger Resonanzfrequenz schwingt die Membran langsam aus, die bei Beschleunigungen und Verzögerungen auftretende Massenträgheit bleibt gering, der Antrieb kann die Bewegung kontrollieren. Mit wachsender Resonanzfrequenz wird die Massenträgheit größer, der Antrieb kann den Ausschwingvorgang immer schlechter abbiegen, ein Überschwingen ist die Folge. Erhöht man die Resonanzfrequenz durch ein zu kleines Gehäuse noch weiter, wird das Überschwingen so stark, daß der Lautsprecher auf neue Signale nicht sauber reagieren kann, da er noch mit sich selbst beschäftigt ist.

Diese Zusammenhänge haben physikalische Grundlagen und gelten daher für alle oben angesprochenen Lautsprechertypen.

Wieviel Watt ist ein Watt?

Ein guter Horn- oder Trichterlautsprecher ist dem herkömmlichen Membranlautsprecher gegenüber in Wirkungsgrad, Verzerrungsarmut und Dynamikverhalten überlegen. Diese Überlegenheit ist erklärbar, dabei zeigen sich gleichzeitig die Grenzen der besten herkömmlichen Membranlautsprecher.

Jeder Lautsprecher wandelt elektrische Energie in akustische Energie um, das Verhältnis der zugeführten elektrischen Energie in Prozent ist der Wirkungsgrad, mit dem der Wandler arbeitet.

Die abgestrahlte Energie breitet sich im freien Raum kugelförmig um den Lautsprecher (Schallquelle) aus. In einem Meter Abstand vom Lautsprecher verteilt sich die Energie auf die Oberfläche der Kugel mit dem Radius $r = 1$, das sind ca. $12,566 \text{ m}^2$, und erzeugt dort eine Schallintensität $J \text{ (W/m}^2\text{)}$. Schallintensität ist das Produkt aus Schalldruck $p \text{ (N/m}^2\text{)}$ und Schallschnelle $v \text{ (m/s)}$. Über die Schallkennimpedanz (früher Schallwellenwiderstand) der Luft $Z_0 \text{ (Ns/m}^3\text{)}$ ergibt sich für jede Schallintensität ein bestimmter Schalldruck, der vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden kann.

Der Wirkungsgrad eines Membranlautsprechers hegt zwischen ca. 0,1 und 5%, höhere Werte erweisen sich in der Praxis als problematisch, da zwischen dem Wirkungsgrad eines Membranlautsprechers und der Größe des Lautsprechergehäuses ein direkter Zusammenhang besteht. Um tiefe Töne zu erzeugen muß der Lautsprecher in ein Gehäuse eingebaut sein, die Größe dieses Gehäuses bestimmt maßgeblich mit welchem Wirkungsgrad diese tiefen Töne abgestrahlt werden. Um zum Beispiel, einen Ton der Frequenz 20 Hz mit einem Wirkungsgrad von 5% abzustrahlen, muß das Lautsprechergehäuse ein Volumen von

mindestens 1600 l haben, für einen Wirkungsgrad von 0,5% genügen schon 160 l. Jede Erhöhung des Wirkungsgrades geht damit bei einer vorgegebenen Gehäusegröße zu Lasten der Baßleistungsfähigkeit¹. Das gilt grundsätzlich für jeden Membranlautsprecher in allen geschlossenen und Baßreflexgehäusen, denn es ist eine Folge physikalischer Gesetzmäßigkeiten.

(Small, R.H., Vented box loudspeakers Systems Part 1+2 Journal Audio Engineering Society, June, July 1973)

Daraus ergibt sich für ein Lautsprechergehäuse mit einem Volumen von 100 l, einer noch üblichen Größe, bei einem Wirkungsgrad von 5% eine untere Grenzfrequenz, bei der der Schalldruck auf die Hälfte abgefallen ist, von 50 Hz.

Ein weiteres Problem entsteht durch den, gemessen an der Wellenlänge tiefer Töne, sehr geringen Membrandurchmesser. Ein Ton der Frequenz 100 Hz hat bereits eine Wellenlänge von 3,4 m. Die Schallenergie, die eine Lautsprechermembrane erzeugen kann, ist abhängig vom „Strahlungswiderstand“ der Membran. Strahlungswiderstand ist ein Teil der „Strahlungsimpedanz“, des Widerstandes den die Luft dem Strahler (Membran) entgegensetzt. Diese Strahlungsimpedanz ist das Produkt aus Schallkennimpedanz (s_0) und Fläche des Strahlers. Je größer die Fläche des Strahlers ist, umso größer ist also auch der Strahlungswiderstand. Wird die Membran klein gegen die Wellenlänge der abzustrahlenden Frequenz, so nimmt der Strahlungswiderstand sehr stark ab, er wird quadratisch zur Frequenz geringer.

Um weiterhin den gleichen Schalldruck zu erzeugen, muß die Auslenkung der Lautsprechermembran quadratisch zunehmen.

Um eine zugeführte Energie von 200 W bei einem Wirkungsgrad von 5% umzuwandeln, muß eine Membran von 40 cm Durchmesser eine Auslenkung von 4,8 cm bei 50 Hz und eine Auslenkung von 25 cm bei 20 Hz machen.

Selbst wenn durch die Anwendung des Baßreflexprinzips diese Auslenkung im Bereich der Resonanzfrequenz deutlich vermindert werden kann, erreichen auch die besten Lautsprecher hier die Grenze ihrer mechanischen und elektrischen Belastbarkeit.

Lautere Töne werden nicht entsprechend laut wiedergegeben, die Dynamik wird komprimiert, die Verzerrungswerte liegen bereits vorher über 10%.

Eine Energie von 10 akustischen Watt (200 W elektr. bei 5% Wirkungsgrad) ergibt einen Schalldruck von 120 dB in einer Entfernung von einem Meter, ein recht hoher Wert, im ungünstigsten Fall waren es in vier Meter Entfernung jedoch nur noch 108 dB (Kugel mit $r = 4$), wobei argerscherweise die vom Lautsprecher erzeugten Verzerrungen mit größerer Entfernung nicht geringer werden.

Tuned Pipe Ist 1 = 8?

Bei der Aufstellung eines Lautsprechers in einem reflexionsfreien Raum verteilt sich die vom Lautsprecher abgestrahlte Schallenergie auf die Oberfläche einer Kugel in deren Zentrum der Lautsprecher steht. Da mit steigender Frequenz die Schallwellenlängen kleiner werden, wird die Frontwand des Lautsprechergehäuses bei hohen Frequenzen groß gegen die Wellenlängen, sie wird zur „unendlichen Schallwand“, der Lautsprecher strahlt nur noch über die Fläche einer Halbkugel ab.

Steht ein Lautsprecher in der Ecke eines Raumes, so verringert sich die zur Schallabstrahlung nutzbare Oberfläche auf 1/8 der Kugeloberfläche. Da aber Schallenergie = Schallintensität (Schallstärke) x beschallter Fläche ist, muß die Schallintensität auf das 8-fache steigen. Zu hohen Frequenzen hin verliert sich dieser Effekt, verglichen mit der halben Kugeloberfläche, erhöht sich die Schallintensität nur auf den 4-fachen Wert. Zu höheren Frequenzen beginnt die Lautsprechermembran den Schall gerichtet abzustrahlen, der Effekt verliert sich völlig.

Damit wird ein, in einem reflexionsfreien Raum linear arbeitender Lautsprecher, bei Aufstellung in einer Raumecke den 8-fachen Baß erzeugen, was einer Erhöhung der zugeführten Leistung um 9 dB entspricht.

Diese Baßanhebung läßt sich vermeiden, wenn der Lautsprecher zu den tiefen Frequenzen hin, bei gleicher zugeführter Leistung, weniger Schallenergie abgibt, also mit geringerem Wirkungsgrad arbeitet. Da aber der Wirkungsgrad eines Lautsprechers in dem Bereich tiefer Frequenzen proportional zum Gehäusevolumen ist, entspricht eine Verringerung des Wirkungsgrades auf 1/8 auch einer Verringerung des nötigen Gehäusevolumens auf 1/8.

Bei korrekter Abstimmung erreicht ein solcher Lautsprecher die Leistungsfähigkeit eines Lautsprechers 8-facher Größe!

Oder mehr?

Bei der Tuned Pipe ist der Lautsprecher über eine akustische Leitung an die Luft „angekoppelt“ um die Membranauslenkung im Bereich der tiefen Frequenzen zu verringern.

Diese akustische Leitung arbeitet folgendermaßen:

Ein unendlich langes Rohr (akustische Leitung) wäre als ein unendlich langes zylindrisches Hörn ein idealer Belastungswiderstand für die Lautsprechermembran. Leider kann man ein Rohr nicht unendlich lang machen.

Bei einem Rohr endlicher Länge treten Resonanzerscheinungen (Rohrresonanz) aufgrund des plötzlichen Überganges an die Luft auf, wobei bestimmte Töne schwächer, andere stärker abgestrahlt werden. Die Strahlungsimpedanz, also der Widerstand, der der Lautsprechermembran entgegengesetzt wird, schwankt sehr stark in Abhängigkeit von der Frequenz, in den Bereichen niedriger Impedanz wird die Membranauslenkung sehr groß.

Bei der Tuned Pipe wird der Druck in der akustischen Leitung langsam und gleichmäßig abgebaut. Am Anfang der exponentiellen Öffnung wird der Druck in der Leitung bereits durch die kleine Öffnung um einen bestimmten Betrag vermindert, um den jetzt geringeren Druck um den gleichen Betrag zu verringern muß die Öffnung größer werden, wieder verringert sich der Druck usw. Das Ergebnis ist eine exponentielle Öffnung durch die der ganze Druck gleichmäßig abgebaut wird, das garantiert eine geringe Membranauslenkung auch bei hohem Schalldruck und ermöglicht so verzerrungsfrei Baßwiedergabe auch bei sehr hohen Schalldruckpegeln.

Das gleiche Prinzip ist auch bei Mitteltönern (Midrange Pipe) und Hochtönern (Sound Laser) anwendbar, wobei die verringerte Membranauslenkung grundsätzlich die Verzerrung vermindert.

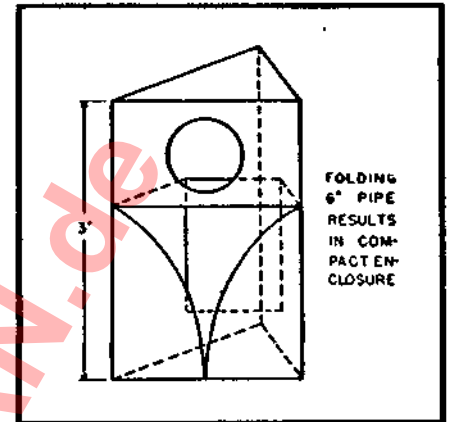
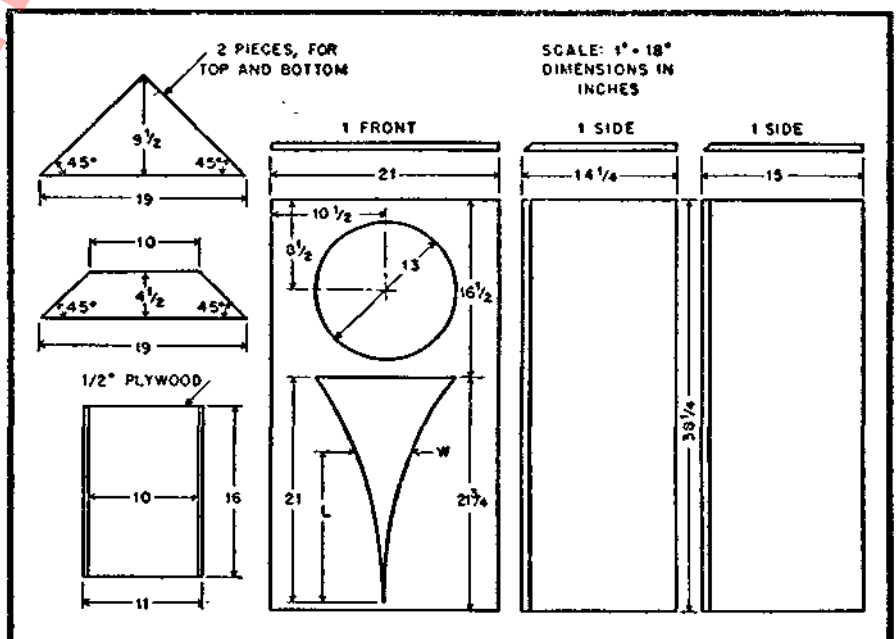
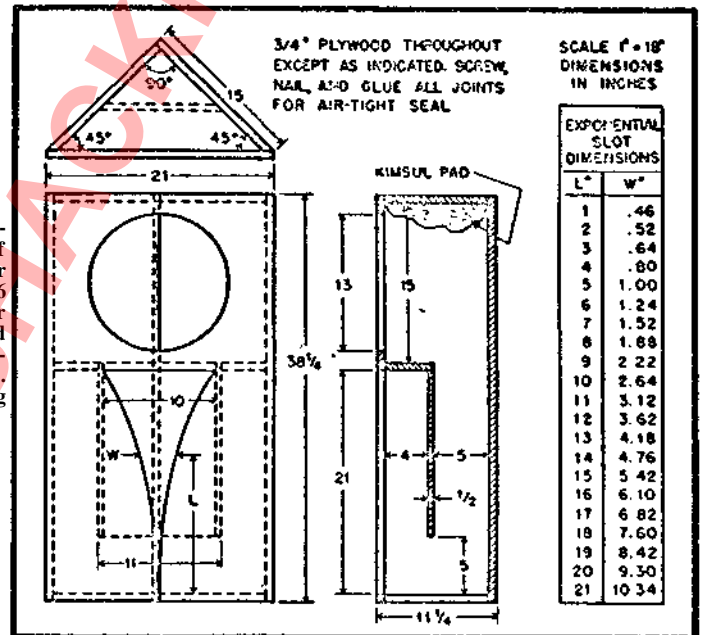


Fig. 3. Appearance of cabinet after folding from the original "pipe" of Fig. 2.

Fig. 5. (right). Sectional drawings of the simplified corner enclosure. Fig. 6 (below). Details for cutting plywood piece for the cabinet. 15x15 in. Speaker mounting panel.



Der Hornlautsprecher

Um den Strahlungswiderstand einer Membran zu erhöhen, kann ein Hörn vor der Membran angebracht werden. Je größer die Fläche der Hornöffnung ist, umso größer ist auch der Strahlungswiderstand dieser Fläche.

Bei einem Hörn mit einer unteren Grenzfrequenz von 50 Hz ist die Strahlungsimpedanz z. B. 50-fach größer als die einer Membran mit 40 cm Durchmesser. Diese hohe Strahlungsimpedanz belastet über das Hörn die Lautsprechermembran. Der Lautsprecher kann Schall nur aus der Hornöffnung abstrahlen, deren Strahlungsimpedanz sehr groß ist. Im Hörn verringert sich die Querschnittsfläche zum Lautsprecher hin, die Strahlungsimpedanz Z_s also $Z_0 \cdot x^2$ hat einen bestimmten Wert, wird die Fläche kleiner muß Z_0 größer werden. Über die Beziehung Schalldruck / Schallschnelle = Schallkennimpedanz ergibt sich, daß mit wachsender Schallkennimpedanz im Hörn der Schalldruck größer und die Schallschnelle kleiner werden muß. Damit liegen die Verhältnisse für eine Lautsprechermembran am Hornhals wesentlich günstiger.

Die Membran eines Lautsprechers hat eine bestimmte Masse, die bei einem Baßlautsprecher über 100 g betragen kann. Masse ist in der Physik die Eigenschaft jeder Materie, träge zu sein. Trägheit ist der Widerstand den jeder Körper einer Änderung seiner Geschwindigkeit entgegensetzt. Die Änderung der Geschwindigkeit ist die Beschleunigung oder Verzögerung. Da eine Membran, um Schall abzustrahlen, schwingt, also beschleunigt, verzögert und wieder neu beschleunigt, wobei die zur Verfügung stehende Zeit durch die Frequenz (Schwingung / Sekunde) feststeht, wächst mit der Auslenkung auch der Widerstand, den die Membran dieser Auslenkung entgegensetzt. **Die Membran hat eine hohe mechanische Impedanz.**

Das Hörn kann die geringe Schallkennimpedanz der Luft auf einen Wert vergrößern, der der hohen mechanischen Impedanz der Lautsprechermembran entspricht, es ist ein „Impedanztransformator“!! Damit ist eine ideale Anpassung des Lautsprechers an die Luft möglich, weil die Membran hohen Druck bei geringer Auslenkung (Schnelle) erzeugen muß. Durch die verringerte Auslenkung nimmt die Massenträgheit der Membran ab, die Energie, die bisher nötig war, um diese Trägheit zu überwinden, kann in Schallenergie umgewandelt werden. Als Folge dessen kann der Wirkungsgrad eines Hornlautsprechers bei tiefen Frequenzen über 90% betragen!

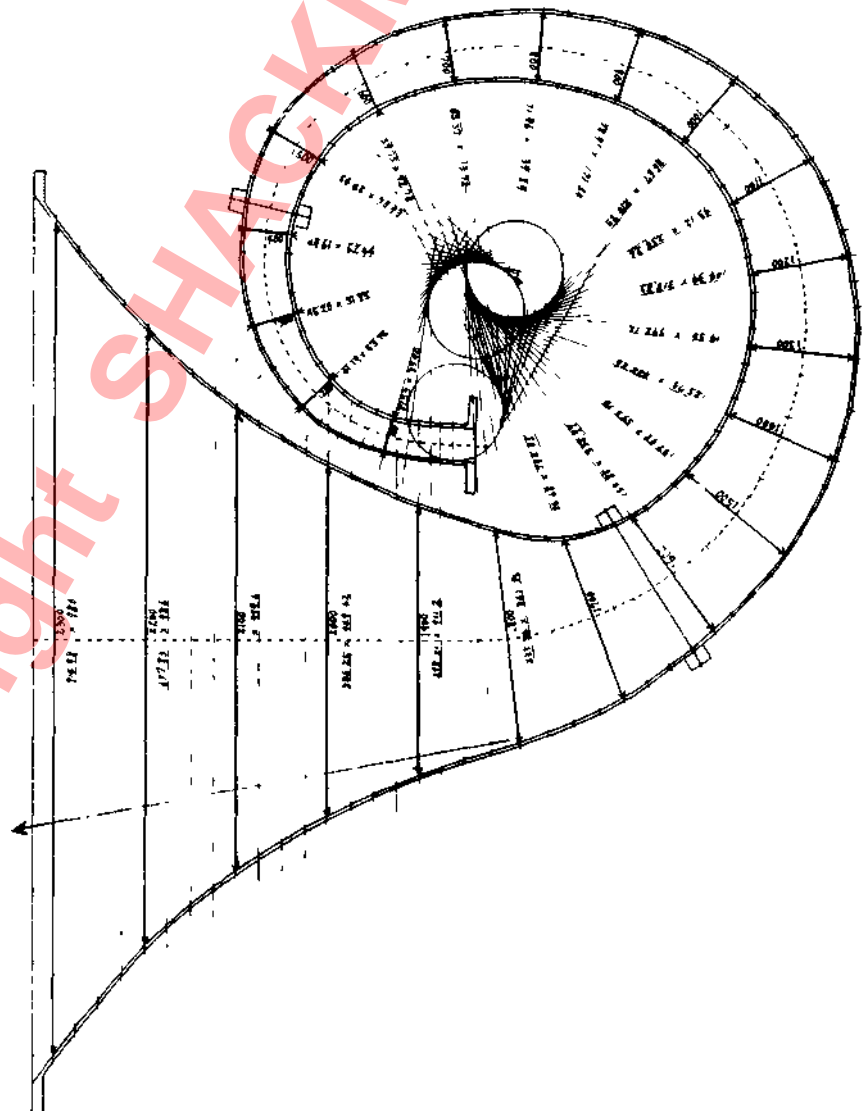
Zu höheren Frequenzen muß der Wirkungsgrad eines solchen Lautsprechers allerdings geringer werden, da die Beschleunigung einer Membran und damit die Massenträgheit frequenzabhängig ist (gleiche Auslenkung bei kürzerer Zeitdauer = höhere Beschleunigung). Die Massenträgheit der Membran wächst mit der Frequenz, auf diese Erscheinung hat das Hörn keinen Einfluß.

Schon aus diesem Grund ist die Entwicklung eines Hornlautsprechers, der über einen weiteren Frequenzbereich mit dem gleichen hohen Wirkungsgrad arbeiten soll, nicht ganz einfach.

Durch die Zusammenhänge zwischen Länge, Widerstand und Masse des Schwingspulenrahtes, der Stärke des Magnetfeldes, der Membranmasse sowie der Federsteife der Membranaufhängung, der mechanischen Verluste und einiger unangenehmer Eigenschaften der Luft im Hörn, wird die genaue Berechnung sogar außerordentlich kompliziert. **Dafür leistet ein guter Hornlautsprecher allerdings auch bei einem Wirkungsgrad von 50% das zehnfache eines normalen Lautsprechers, er ersetzt 10 Lautsprecher samt der dazugehörigen Endverstärker.**

Durch die reduzierte Membranbewegung bleiben die Verzerrungen dabei sehr gering und eine Dynamikkompression tritt nicht auf. Erst bei sehr hohen Schalldruckpegeln beginnt das Hörn selbst Verzerrungen zu erzeugen. Die Verzerrungswerte sind abhängig von der Art des Hornes (Exponential- Tractrix- hyperbolisches Hörn) und der Konstruktion, und liegen bei 10 akustischen Watt zwischen 0,1 und 2%.

Der Hornlautsprecher bietet also auch heute noch Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Lautsprechersystem, und es wird auch in Zukunft so bleiben, denn egal wie gut die Lautsprecherchassis noch werden mögen, an einem Hörn sind sie noch besser.



Western Electric WE 66 A, eine verkleinerte Version des legendären Basshorns WE15A

Der Lautsprecher im Raum — oder Klangmanipulation

Wie bereits in der letzten Ausgabe dieses Handbuches beschrieben wurde, hat die Aufstellung der Lautsprecherboxen im Abhörraum großen Einfluß auf die Wiedergabe tiefer Frequenzen. Dieser Umstand hat oft für Enttäuschung gesorgt, da die Box natürlich später in einem anderen Raum steht als bei der Vorführung durch einen Händler. Verglichen mit einer Box deren Wiedergabekurve im schalltoten Meßraum völlig linear ist, können bei der Aufstellung in einem Raum Anhebungen bis +9 dB und Absenkungen bis -11 dB auftreten. Diese Anhebungen und Absenkungen können den Klangcharakter einer Box grundlegend verändern, da bei falscher Aufstellung grundsätzlich beide zunehmen. Im Extremfall werden dabei die Grundtöne tieffrequenter Instrumente fast doppelt so laut, und manche klangbildenden Oberwellen dagegen nur mit halber Lautstärke empfunden. (6 dB entsprechen dem doppelten Schalldruck, 10 dB entsprechen einer subjektiv empfundenen Lautstärkeverdoppelung.) Eine solche Klangveränderung kann selbst die beste Box ungenießbar werden lassen. Die physikalische Ursache dieses Phänomens sind virtuelle (scheinbare) Schallquellen, die durch Reflektion des abgestrahlten Schallfeldes an Raumwänden entstehen. Diese virtuellen Schallquellen haben den gleichen Einfluß wie echte Schallquellen, z. B. andere Boxen, die ebenfalls in Betrieb sind, es kommt zu mehr oder weniger ausgeprägten Überlagerungserscheinungen (Interferenzeffekte), da die Schallquellen räumlich voneinander getrennt sind. Die Folge dieser Überlagerung sind frequenzabhängige Verstärkungen oder Abschwächungen.

Die größten Abweichungen ergeben sich, wenn alle Abstände der Schallquelle Membran zu den Wänden und dem Boden gleich sind. Bild 1 zeigt den Einfluß der Aufstellung auf einen durchschnittlichen Lautsprecher nach dem Prinzip der geschlossenen Box mit einer Resonanzfrequenz von 40 Hz und einem Gütefaktor von $Q_{tc} = 0,7$ bei einem Abstand von 70 cm zu Boden und Seiten- bzw. Rückwand. Solche und ähnlich fatale Fehlauflösungen kommen leider aus Platzgründen recht häufig vor und trüben die Freude am Hören erheblich. Jeder Versuch mit einem Equalizer zu linearisieren scheitert spätestens an den Absenkungen, da mehr zugeführte Leistung leider auch die Leistungsfähigkeit der abschwächenden Reflektionen entsprechend steigert. Darüberhinaus bringt ein Equalizer wieder neue elektronische Probleme ins Spiel. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn einige Hifi Perfektionisten mit ihrer Lautsprecherbox einige Kilometer im eigenen Wohnzimmer zurücklegen, um den optimalen Aufstellungsort zu finden. Wie sich später zeigen wird, kommt es dabei je nach Box manchmal auf den Zentimeter an. Dieser Umstand erschwert das Auffinden der optimalen Position recht gründlich.

Um etwas Klarheit in diese Problematik zu bekommen, hilft eine mathematische Analyse der Raumeinflüsse, die Ergebnisse sind in der Tabelle zusammengefaßt. Das Ziel war dabei, für bestimmte Lautsprecher mit verschiedensten Daten jeweils die optimale Position für lineare Baßwiedergabe zu finden. Die Ergebnisse sind überraschend und erklären einige, bereits aus Hörtests bekannte, Erfahrungen mit der Aufstellung von Lautsprechern, zum Beispiel warum unterschiedliche Boxen im gleichen Raum verschiedene optimale Aufstellungsorte haben.

Der Schalldruckfrequenzgang einer Lautsprecherbox wird im Bereich tiefer Frequenzen durch die Werte von Resonanzfrequenz f_c und Gesamtgüte Q_{tc} beschrieben. Hinsichtlich der Kombination dieser Werte gibt es große Unterschiede bei verschiedenen Lautsprecherboxen. Die Tabelle gibt für einen breiten Kombinationsbereich jeweils drei Längen l_1 , l_2 und l_3 , die den jeweils optimalen Aufstellungsort der Tiefmembran festlegen. Welche der Längen dabei für den Abstand zum Boden oder den Wänden gewählt wird, ist unwesentlich, es müssen immer nur alle drei Abstände realisiert werden.

Diese, ohne Rücksicht auf Realisierbarkeit, im Wohnzimmer ausgeführte Berechnung zeigt sofort die Schwierigkeit bei der Aufstellung von Lautsprecherboxen mit tiefer Resonanzfrequenz. Eine Box mit den Daten $f_c = 20$ Hz und $Q_{tc} = 0,5$ wäre erst in einem Raum von ca. 6,50x9 m Seitenlänge optimal zu integrieren. Innenarchitekten dürften allerdings noch andere Argumente ins Spiel bringen.

Bei höheren Resonanzfrequenzen werden die Verhältnisse günstiger, der Einfluß des Gütefaktors bleibt dabei offensichtlich immer gleich. Je geringer Q_{tc} ist, um so näher darf die Box an den Wänden aufgestellt werden, um optimale Baßwiedergabe zu realisieren. Hier zeigt sich, was auch frühere Hörtests bewiesen haben: Boxen mit früh und weich abfallendem Schalldruckfrequenzgang im schalltoten Meßraum sind im praktischen Betrieb aufstellungsfreundlicher und klingen bei willkürlicher Aufstellung meist besser, als solche, die bereits im schalltoten Meßraum einen linearen Frequenzverlauf zeigen. Ein solcher Frequenzgang, Merkmal eines niedrigen Gütefaktors (Q_{tc} kleiner 0,7), bringt weiterhin Vorteile im dynamischen Verhalten, da ein Überschwingen der Lautsprechermembran vermieden wird. (Vgl. dazu das Kapitel: Geschlossene Boxen.)

Die Tabelle zeigt daneben eine andere Möglichkeit, die schon einigen Ärger bereitet hat. Es gibt eine größere Zahl Lautsprecherboxen bei denen der Magnet des Baßchassis zum Opfer kaufmännischer Kalkulation wurde. Diese Abwesenheit von Magnetmaterial äußert sich meßtechnisch in Q_{tc} Werten von 1,2 bis 2,0. Der Q_{tc} Faktor einer Box gibt den Schalldruck bei Resonanzfrequenz relativ zum Schalldruck bei höheren Frequenzen an. $Q_{tc} = 2,0$ bedeutet also

6 dB mehr Schalldruck bei der Resonanzfrequenz als in anderen Frequenzbereichen, schlicht gesagt: doppelten Schalldruck. Eine solche Box produziert Pseudobässe und gleichzeitig ein hoffnungsloses Überschwingen beim Ausschwingvorgang, die Ursache für den hohen Schalldruck bei der Resonanzfrequenz. Durch geschickte Aufstellung im Abhörraum kann ein solcher Lautsprecher im Schalldruckfrequenzgang linearisiert werden, der Lautsprecher überzeugt selbst im direkten Vergleich mit einer sehr guten Box durch ausgeglichenen tiefen Baß bei kleinem Volumen. Die sorgsame Wahl des Musikprogramms, die dynamisch anspruchsvolle Passagen wie Schlagzeug oder angerissene Baßsaiten vermeidet, läßt den Hörer über das dynamische Unvermögen im Unklaren, die große Überraschung kommt später zuhause. Derartige Praktiken sind denkbar, mehr sollte damit nicht gesagt werden. Gezielte Fragen über die wesentlichen Daten einer Lautsprecherbox können hier helfen; eventuell schriftlich bestätigen lassen.

Der Bereich zwischen 60 und 80 Hz zeigt dagegen wie unproblematisch kleine Boxen mit höheren Resonanzfrequenzen in der Aufstellung sind, ein Grund dafür, warum gerade diese Boxen oftmals sehr ausgewogen und natürlich klingen. Durch die Kopplung mit dem Raum ist der Frequenzbereich um 2/3 Oktaven nach unten erweitert und oberhalb dieser Frequenz innerhalb 2-3 dB linear. Natürlich ist der Maximalpegel meist durch die kleinen Membrandurchmesser geringer als der großer, tiefabgestimmter Boxen.

Angesichts der großen Zahl bekannter Boxen mit tiefer Resonanzfrequenz und Q_{tc} Werten um 1,0 ist das Ergebnis dieser Berechnungen erschreckend. Sollte man diese Boxen nur in riesigen Räumen mit gutem Ergebnis aufstellen können? So schlimm ist es zum Glück nicht; solange nicht alle Entfernungen gleich oder sehr ähnlich sind, bleiben die Auswirkungen nicht so gravierend wie in obigem Beispiel. Das Gehör ist weiterhin gegenüber Pegelschwankungen im Bereich tiefster Frequenzen nicht so empfindlich wie im oberen Frequenzbereich; wählt man möglichst unterschiedliche, nicht zu kleine Abstände, so ist die resultierende Nichtlinearität nicht so störend. Eine gewisse Baßanhebung wird in manchen Fällen sogar subjektiv angenehm empfunden.

Perfektionisten haben dagegen mit dieser Tabelle ein Werkzeug, das langwierige Versuche verkürzen kann, vorausgesetzt die Parameter f_c und Q_{tc} der Lautsprecherbox sind bekannt.

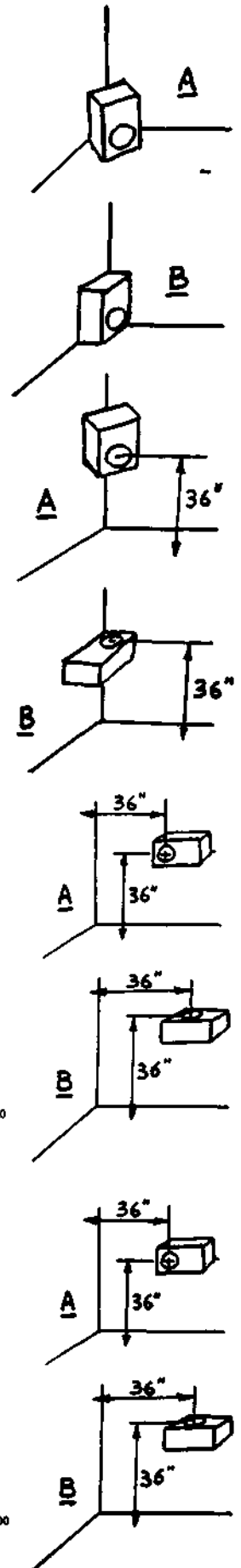
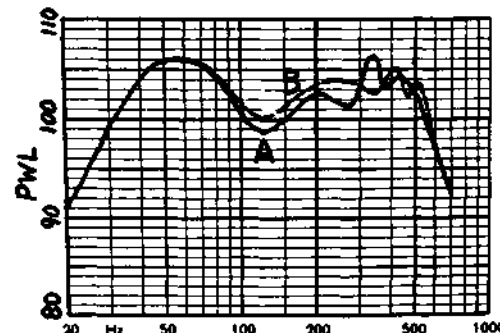
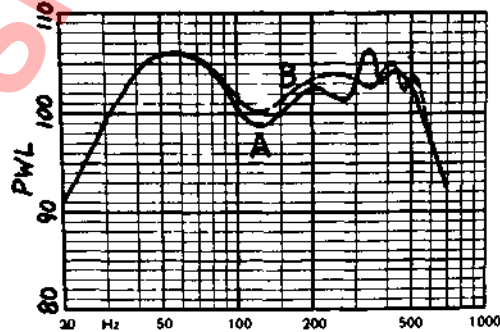
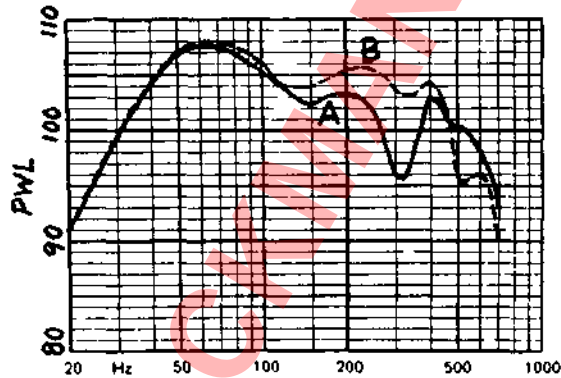
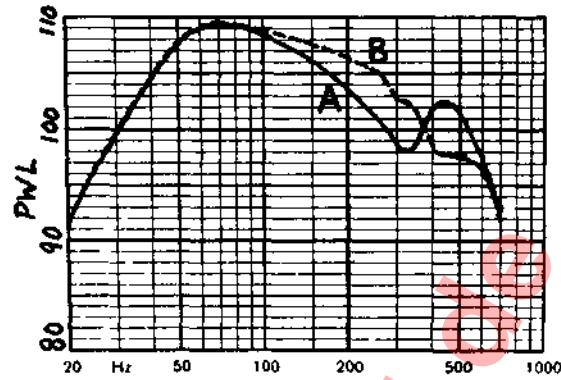
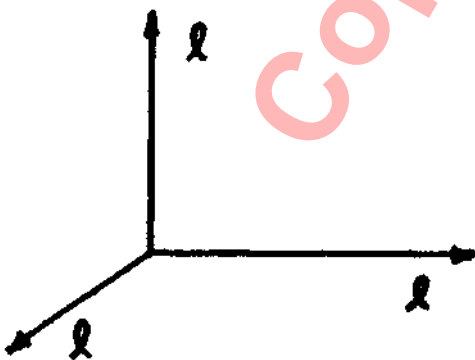
Da beim Lautsprecherselbstbau diese Werte über das Gehäuse in Grenzen variierbar sind, ergeben sich weiterhin Möglichkeiten, eine Box für einen bestimmten Aufstellungsort zu optimieren.

Diese Optimierungsmöglichkeit ist beispielsweise für Tonstudios sehr interessant, mittels geeigneter Lautsprecherchassis in kleinen Gehäusen ($Q_{tc} = 0,5$ und $f_c = 60$ Hz) ist eine weitgehend lineare Baßwiedergabe bis ca 43 Hz möglich, ohne die üblichen Equahzerprobleme in Kauf nehmen zu müssen. Da sich solche Boxen zur Wandmontage eignen, l_3 entspricht mit 30 cm der Entfernung von Membran zur Rückseite der Box, ist die Unterbringung bei beengten Platzverhältnissen unproblematisch.

Wie bereits erwähnt, wurden diese Berechnungen für geschlossene Boxen vorgenommen, diese bringen wie Hornlautsprecher durch das gute Ausschwingverhalten beste dynamische Ergebnisse und kommen so den Ansprüchen des Perfektionisten am nächsten.

Bei Baßreflex- und Transmissionshne-Boxen ist die Berechnung durch die räumlich getrennten Schallquellen Membran und Tunnelöffnung komplizierter, die Ergebnisse sind aber recht ähnlich.

f_s	QTC	l_1 (m)	l_2 (m)	l_3 (m)
20 Hz	1,41	4,010	4,780	2,90
	1,000	2,520	5,410	3,450
	0,707	1,600	4,400	2,700
	0,500	1,660	2,880	0,890
30 Hz	1,410	2,680	3,190	1,940
	1,000	1,680	3,610	2,300
	0,707	1,060	2,820	1,800
	0,500	1,110	1,920	0,610
40 Hz	1,410	2,000	2,390	1,460
	1,000	1,260	2,710	1,730
	0,707	0,810	2,200	1,350
	0,500	0,830	1,440	0,450
50 Hz	1,410	1,610	1,920	1,160
	1,000	1,010	2,170	1,380
	0,707	0,640	1,770	1,090
	0,500	0,670	1,150	0,350
60 Hz	1,410	1,340	1,590	0,970
	1,000	0,840	1,800	1,150
	0,707	0,530	1,470	0,900
	0,500	0,560	0,960	0,290
70 Hz	1,410	1,140	1,360	0,830
	1,000	0,720	1,540	0,980
	0,707	0,460	1,260	0,760
	0,500	0,470	0,810	0,250



Die Frequenzkurven zeigen die Abhängigkeit der Baßwiedergabe einer Lautsprecherbox von der Aufstellung

Baß — oder was?

Die Wiedergabe tiefer Frequenzen in kleinen Räumen ist ein vieldiskutiertes Problem. Einerseits können sich Schallwellen, die groß gegen die Raumabmessungen sind, in einem solchen Raum aus physikalischen Gründen nicht ausbreiten. Andererseits sind offensichtlich in manchen Fällen auch tiefste Frequenzen in sehr kleinen Räumen hörbar. Bei gleich niedriger Resonanzfrequenz sind dabei Lautsprecher mit sehr großen Membranen anscheinend geeigneter, tiefste Frequenzen mit hörbarem Schalldruck zu erzeugen, als solche mit kleinen Membranen.

Zur Erklärung dieses Phänomens ist ein kurzer Ausflug in die Raumakustik sehr nützlich. Wie eingangs erwähnt, hat jeder Raum eine untere Grenzfrequenz, unterhalb der im Raum keine Schallwellen erzeugt werden können. Woran liegt das? Die Schallenergie, die z. B. von einem Lautsprecher abgegeben wird, kann in dem Medium Luft bekanntlich in Form kinetischer Energie (Bewegung der Luftmoleküle) oder als potentielle Energie (Kompression der Luft) vorkommen. In einer Schallwelle pendelt die Energie zwischen beiden Formen hin und her und breitet sich als Schallenergie im Raum aus.

Die Wand eines Raumes verhindert jedoch eine Bewegung der Luftmoleküle, hier ist nur eine Kompression möglich. Daraus folgt, daß die längste Schallwelle, die in einem Raum erzeugt werden kann, allein vom Abstand der Wände bestimmt wird. Eine halbe Schallwelle mit zwei Druckmaxima an den Wänden und einem Schnellemaxima in der Raummitte kann dabei in einem Raum noch untergebracht werden. Die Wellenlänge der tiefsten Frequenz entspricht also dem doppelten Abstand der Wände. Über die Schallgeschwindigkeit ist die Frequenz errechenbar.

Ein größerer Raum mit den Abmessungen 5x4x2,5 m hat dabei in der längsten Richtung eine Grenzfrequenz von 35 Hz. Um Frequenzen von weniger als 20 Hz als Schallwellen unterzubringen, ist ein Abstand von mindestens 10 m nötig. In kleinen Räumen liegt die Grenzfrequenz natürlich höher, im Durchschnitt sind es meistens 40 Hz.

Diese Grenzfrequenz bedeutet allerdings nicht, daß tiefere Töne in solchen Räumen nicht hörbar gemacht werden können. Da Schallwellen zur Übertragung der Schallenergie ausfallen, müssen diese Töne über Druckwechsel hörbar gemacht werden, der Raum wird zur Druckkammer. Ändert man das Volumen eines geschlossenen Raumes, so ändert sich auch der Druck im Raum proportional. Diese Volumenänderung wird im Abhörraum durch die Auslenkung der Membranfläche erzielt. Die Wiedergabe tiefster Frequenzen ist dabei **frequenzunabhängig** nur eine Folge der Volumenänderung. Bei konstanter Membranauslenkung können im Raum auch tiefste Frequenzen reproduziert werden. Die Anforderungen an Membranfläche und Auslenkung sind dabei jedoch bereits bei einer idealen (luftdichten) Druckkammer recht erheblich,

normale Räume weichen darüberhinaus von diesem Idealfall immer mehr oder weniger stark ab.

Um in einer idealen Druckkammer von 5x4x2,5 m Abmessung einen Schalldruck von 100 dB zu erzeugen muß die Membran eines 38 cm Lautsprecherchassis je 1 cm Hub in beiden Richtungen ausführen, bei 120 dB wären es bereits 8 cm in beiden Richtungen. Diese 120 dB kommen bei Frequenzen unter 40 Hz in normalem Musikprogramm zum Glück nicht vor, Wohnzimmer mit idealen Druckkammereigenschaften leider auch nicht. In den meisten Fällen sind erheblich größere Auslenkungen nötig. Allein die Verkleinerung des Raumvolumens macht es der Membran etwas einfacher, daher klingen riesige Boxen in kleinsten Räumen ab und zu recht gut (Tür zu). Leider ist der Übergang zur Druckkammer bei allen Räumen unterschiedlich, ebenso das Raumvolumen, beides Gründe für die unterschiedlichen Standpunkte der Betroffenen. Weiterhin erfüllen keine Lautsprecherchassis die Forderung nach konstanter Membranauslenkung. Je nach Q_{tc} Faktor nimmt die Auslenkung oberhalb und unterhalb der Resonanzfrequenz rapide ab (vgl. das Kapitel „Geschlossene Boxen“). Ein Equalizing erfordert bei geschlossenen Boxen höchste Verstärkerleistung und Belastbarkeit, da die Federsteife der Luft im Gehäuse überwunden werden muß, und ist zudem bei Baßreflexboxen sinnlos, da der Reflextunnel unterhalb der Resonanzfrequenz „offen“ ist und bei Membranbewegungen sofort ein Druckausgleich zwischen Vor- und Rückseite der Membran stattfindet. Ausgenommen sind natürlich Boxen mit einer Resonanzfrequenz unter 15 Hz, diese haben dafür andere Probleme mit der Aufstellung (vgl. das Kapitel: Der Lautsprecher im Raum).

Messen oder hören?

Das menschliche Gehör registriert bei mittleren und hohen Frequenzen den Einfluß indirekter Schallanteile, die durch Reflexion von Decke, Boden und Wänden eines Raumes zum Hörer gelangen, auf den Direktschall vollkommen anders als ein Schallpegelmeßgerät. Ein solches Meßgerät kann nur einen „Momentanwert“ liefern, den Schalldruck, der aus allen Schallwellen (der direkten und allen indirekten) zu einer Zeit und an einem Ort (Meßmikrophon) resultiert. Der Schalldruck ist ein frequenzabhängiger Wechsel von Unter- und Überdruck in der Luft (Schwingung). Da die Wegstrecken von direkten und indirekten Schallanteilen unterschiedlich groß sind, kommt es zur Überlagerung gleicher (Überdruck + Überdruck) und ungleicher (Überdruck + Unterdruck) Zustände, abhängig vom Verhältnis des Wegstreckenunterschiedes zur Wellenlänge der untersuchten Frequenz. Diese „Interferenzen“ zeigt das Meßgerät als Anhebung bestimmter und Absenkung anderer Frequenzen an.

Ein Lautsprecher mit linearem Frequenzgang im reflektionsfreien Raum wird in einem Wohnraum immer eine mehr oder weniger „verbogene“ Schalldruckmeßkurve zeigen, ohne dabei schlecht zu klingen.

Fast alle Versuche diesen Frequenzgang mit elektronischen Mitteln zu linearisieren, führen erfahrungsgemäß zu einer klanglichen Verschlechterung.

Der Grund hierfür ist die Fähigkeit des Gehörs zwischen gleichen aber zeitlich verschobenen Signalen zu unterscheiden. Da der reflektierte Schall eine größere Wegstrecke als der Direktschall zurücklegen muß, ergibt sich über die konstante Schallgeschwindigkeit (ca. 343 m/s) eine zeitliche **Verzögerung**.

$$1 \text{ m} : 343 \text{ m/s} = 0,003 \text{ s} = 3 \text{ m/s.}$$

Der zuerst einfallende Schall wird vom Gehör als Originalschall wahrgenommen, dieser und sehr gering verzögerte Schall (Beugung um den Kopf) wird zur Richtungsortung genutzt. Verzögerungen zwischen 1 m/s und 30 m/s werden als Reflexionen bewertet, die Wirkung der Signale mit wachsender Verzögerungszeit stark abgeschwächt. So muß z. B. ein um 10 m/s verzögertes Signal um 10 dB lauter als der Direktschall sein, um die Richtungsortung zu beeinflussen. (Davon profitiert auch ein namhafter amerikanischer Hersteller; diese Erkenntnisse sind allerdings schon älter und nicht wie behauptet von ihm. Haas H., Über die Wirksamkeit eines Einfachechos, Acustica, 1961 S. 49.) Bei größeren Verzögerungszeiten als 30 m/s, werden zwei zeitlich und auch räumlich getrennte Signale gehört.

Die Übergänge zwischen diesen Zeitbereichen sind gleitend.

Alle mehr als ca. 2 m/s verzögerten Signale erzeugen einen Raumeindruck, der von der Summe, Intensität und Verzögerungsdauer der Signale abhängt.

Anders als bei tiefen Frequenzen, wo aufgrund der großen Wellenlängen, Laufzeitunterschiede nicht hörbar sind und die Schalldruckabweichungen vom linearen Verlauf unangenehm hörbar werden, ist der durch die höheren Frequenzen erzeugte Raumeindruck eine natürliche Begleiterscheinung des Hörens. Eine Stimme, die im reflektionsfreien (schalltoten) Raum gehört wird, klingt eigenartig, ebenso bei unnatürlich hohem Reflektionsanteil (Badezimmer-effekt).

Jedes Linearisieren (Einmessen), das über ein Linearisieren des Lautsprechers ohne Raumeinflüsse hinausgeht, verfälscht nicht nur den Direktklang, sondern auch den Raumeindruck mit dem Ergebnis hörbarer Anhebungen und Absenkungen trotz linearer Meßkurve, abgesehen von der Problematik des Linearisierens, da mit jeder Anhebung auch die abschwächenden Reflexionen stärker werden.

Im Sinne einer natürlichen Musikwiedergabe sollten sehr kurze (Störung der Stereo-Ortung) und sehr lange (Echo) Verzögerungszeiten durch geeignete Aufstellung im Raum und Bedämpfung durch Möbel und Vorhänge vermieden werden. Probleme im tieffrequenten Bereich lassen sich durch richtige Aufstellung ebenfalls recht einfach lösen, daher ist bei guten Lautsprechern der Aufstellungsort, in Grenzen, vorgeschrieben.

Meßgerät „Ohr“

Es kann nicht genug darauf hingewiesen werden, mit welcher Perfektion dieses natürliche Meßgerät arbeitet. Im Gegensatz zu anderen Meßgeräten nimmt das Gehör die verschiedensten Messungen gleichzeitig vor und kann so auch kleinste Unterschiede in kurzer Zeit feststellen. Da das Gehör ein intelligentes Meßgerät ist, und über große Hörerfahrung verfügt (da es ja täglich im Einsatz ist), können diese Unterschiede in den meisten Fällen sofort bewertet werden.

Die Natürlichkeit der Wiedergabe und die Räumlichkeit umschreiben dabei alle Wiedergabeeigenschaften der Lautsprecherbox. Eine unnatürliche Wiedergabe wird vom Gehör nicht akzeptiert, selbst wenn alle Meßwerte keine Fehlerquellen zeigen.

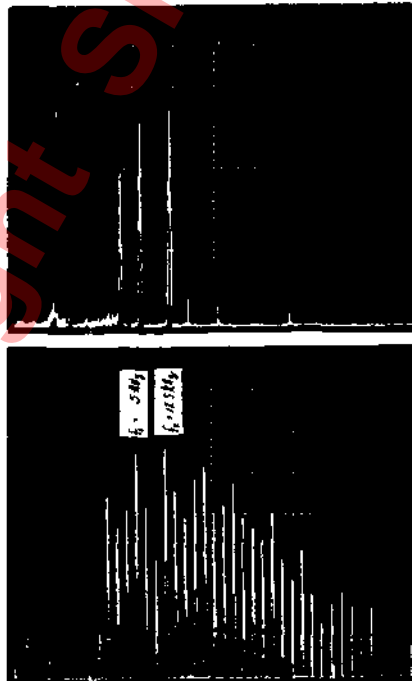
Wenn das Gehör eine Unnatürlichkeit registriert, ist die Ursache dafür natürlich in vielen Fällen meßbar, den Klang eines Lautsprechers nach Meßdaten zu beurteilen, ist dagegen nie möglich. Ein gutes Beispiel dafür ist die „Entdeckung“ der TIM Verzerrungen in HiFi Verstärkern. Einige Verstärker mit hervorragend niedrigen harmonischen Verzerrungen (K_2, K_3) klangen im Betrieb mit Musiksignalen recht eigenartig.

Erst TIM Messungen (transiente Intermodulation), bei denen dem Verstärker gleichzeitig mehrere Signale verschiedener Frequenzen zugeführt werden, zeigen die Ursache für den eigenartigen Klang. Es entstehen dabei im Verstärker einige neue Signale anderer Frequenzen, die in einem bestimmten Verhältnis zu den Frequenzen des Eingangssignals liegen. Da es sich in diesem Fall nicht um Signale handelt, deren Frequenz ein vielfaches der Frequenz der Eingangssignale ist (harmonische Verzerrungen), klingen Verstärker mit ausgeprägten TIM Verzerrungen besonders eigenartig. Harmonische Verzerrungen werden vom Gehör eher akzeptiert, da auch die Oberwellen vieler Musikinstrumente die vielfache Frequenz der Grundschwingung haben. Dieses Problem ist glücklicherweise bei guten Verstärkern vom Tisch, aber damit leider noch nicht aus der Welt. Auch Lautsprecher haben mit diesen Verzerrungen einige Probleme, spätestens, wenn eine Membran, die sich bereits in der Frequenz eines Tones bewegt, einen weiteren Ton abstrahlen soll. Die entstehenden Verzerrungen, die einen ähnlich unnatürlichen Klang verursachen können, waren für P. W. Klipsch bereits 1969 Anlaß für entsprechende Messungen. Die Fotos der Spektralanalyse zeigen in dieser Hinsicht Erschreckendes wie Erfreuliches, die Qualität guter Hornsysteme ebenso wie die Hilflosigkeit eines Ionen-Hochtoners. Beide Ergebnisse sind leicht verständlich. Die erzeugten Verzerrungen sind eine Folge der Membranbewegung. Je kleiner die Fläche eines Strahlers ist, um so größer muß die Bewegung werden, um den gleichen Schalldruck zu erzeugen. Die winzige Membran

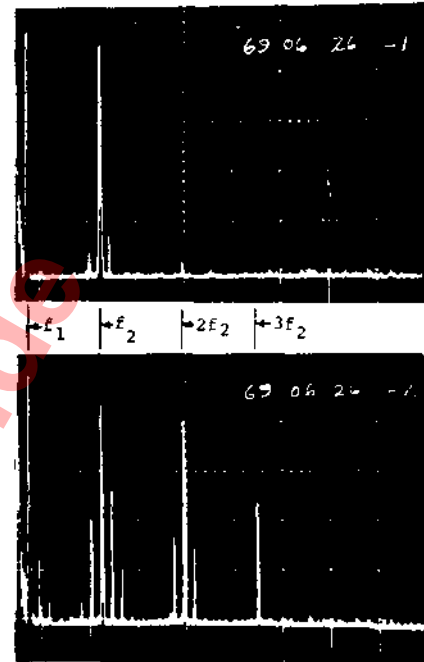
des Ionen-Hochtoners (die Grenzschicht zwischen ionisierter und nicht ionisierter Luft) hat dabei mit 0,25 mm Durchmesser nur 1/100 der Fläche eines 25 mm Kalotenhochtoners, und damit auch die größeren Schwierigkeiten. Bei den Hornsystemen ist die Membranbewegung bekanntlich sehr gering, da die Membranfläche (Hornmundfläche) sehr groß ist.

Bei Membranlautsprecherchassis sind die Verzerrungswerte sehr unterschiedlich, da auch die Nichtlinearität des Antriebs und der Membranaufhängung eine wesentliche Rolle spielen. Bei exotischen Wandler Systemen mit sehr kleiner effektiver Membranfläche wird es nicht möglich sein, diese Verzerrungen auf unhörbare Werte zu reduzieren.

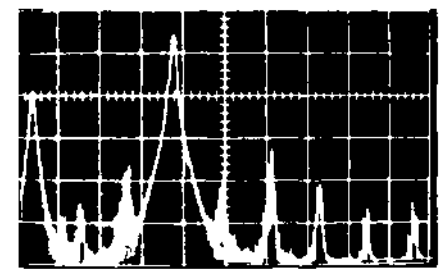
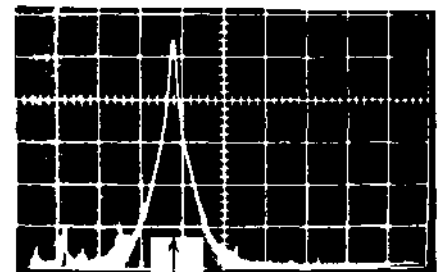
Aber auch diese TIM Messungen können immer nur eine Hilfe sein, wenn nach der Ursache für einen unnatürlichen Klang gesucht wird. Gute Meßwerte bedeuten noch lange keinen guten Klang. Bei einem solchen Hornlautsprecher mit geringen Verzerrungen konnte zum Beispiel durch eine schlechte Hornkonstruktion die Anpassung an die Luft gestört sein. In diesem Fall kommt es zu Reflektionen der Schallenergie an der Hornöffnungsfläche. Ein Teil der Schallenergie wird dabei in das Hörn zurück reflektiert. Die Folge ist ein „verbogener“ Schalldruckfrequenzgang und gestörtes Impulsverhalten. Der Pfeil in Bild 2 markiert eine solche Reflektion, die im Hörn zurückläuft.



Intermodulationsverzerrungen AMD (Amplitude Modulation Distortion) und FMD (Frequency Modulation Distortion)
oben Hochtonhorn sehr guter Qualität
unten Ionenhochtoner
Eingangssignale $f_1 = 5000 \text{ Hz}$
 $f_2 = 12500 \text{ Hz}$



Intermodulationsverzerrungen AMD und FMD bei verschiedener Unchassis oben Mitteltonhorn unten Membranmitteltoner
Eingangssignale, $f_1 = 540 \text{ Hz}$, $f_2 = 4400 \text{ Hz}$ mit 100 dB Schalldruck für f_1 und 92 dB Schalldruck für f_2 . Das Hörn zeigt nur geringe Verzerrungen, die Seitenbänder $f_1 \pm f_2$, dagegen zeigt das durchschnittliche Membranchassis eine ganze Reihe neuer Frequenzen, $2f_1 \pm f_2$, $2f_2 \pm f_1$, f_1 ,



Intermodulationsverzerrungen AMD und FMD
oben sehr gutes Baßhorn
unten Membranchassis mit 25 cm Ø
Der Schalldruck des Baßhorns beträgt dabei 100 dB, der des Membranchassis 90 dB
 $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_2 = 300 \text{ Hz}$, horizontale Teilung 50 Hz pro Teilstrich, vertikale Teilung 10 dB pro Teilstrich

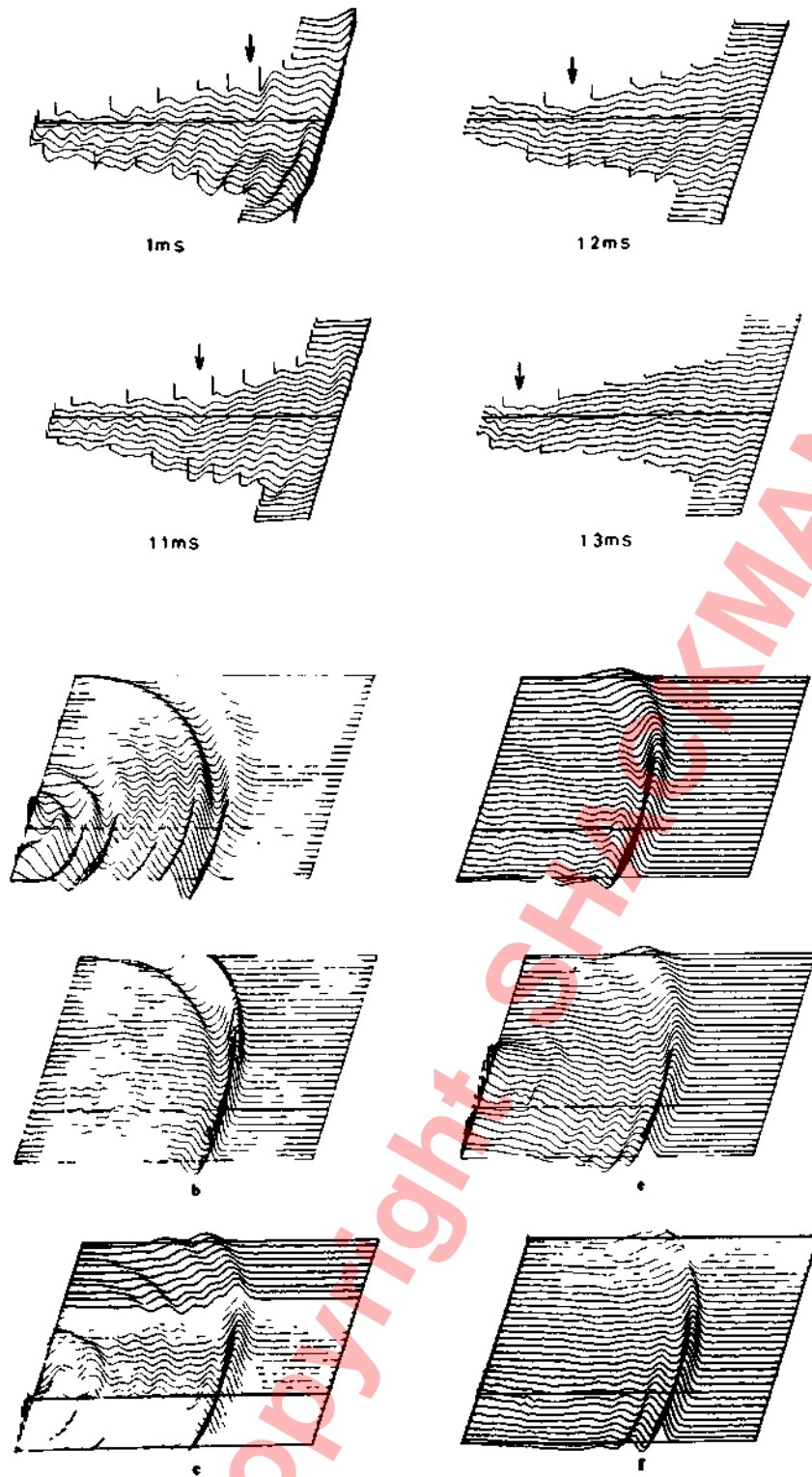


Bild 3 zeigt das Impulsverhalten verschiedener Chassis, a) Hochtöner, b) Bändchentöner, c) Membransystem, d) Air-Motion Transformer, e) Hard Dome Kalotte, f) Soft Dome Kalotte. Ein mehr oder weniger ausgeprägtes Nachschwingen ist

bei allen Chassis feststellbar, es wäre allerdings vermessen, aus diesen Daten auf den Klang der Chassis zu schließen. Nur ein Hörtest kann in vertretbarer Zeit genügend Informationen liefern, um Lautsprecherboxen zu erfassen und zu bewerten.

Flötenklänge

So perfekt ein Lautsprecher auch sein mag, zaubern kann er nicht. Und doch hat es oft den Anschein als würde gerade das von einem guten Lautsprecher erwartet.

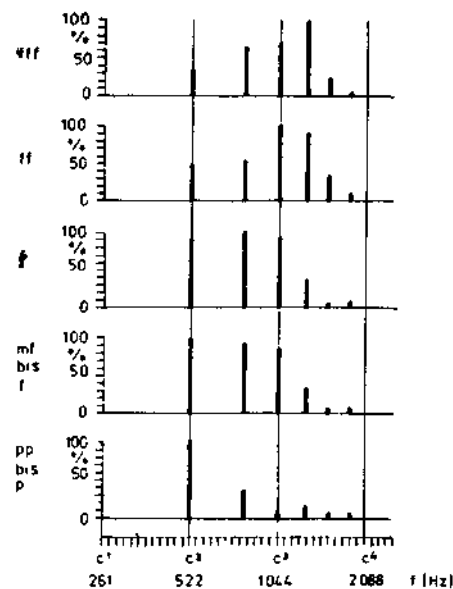
Das Bild rechts zeigt, daß der Klang einer Flöte und die Lautstärke, in der diese gespielt wird, nicht voneinander zu trennen sind. Je lauter die Flöte gespielt wird, umso mehr verlagern sich die am lautesten abgestrahlten Töne zu den hohen Frequenzen.

Dieses Verhalten, das in ähnlicher Form viele Musikinstrumente zeigen, ermöglicht es uns, ein laut gespieltes Instrument von einem gleichen, aber leise gespielten Instrument auch dann zu unterscheiden, wenn der Schallpegel beider Instrumente am Hörplatz gleich groß ist. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn sich das lautere Instrument in größerer Entfernung vom Hörplatz befindet als das leise gespielte.

Zu jedem charakteristischen Klang eines Instrumentes gehört somit eine bestimmte Lautstärke. Sobald ein Musikstück über eine Stereoanlage zu leise wiedergegeben wird, rutschen alle Instrumente mit dieser Eigenart förmlich nach hinten. Wird das Musikstück zu laut wiedergegeben schieben sich diese Instrumente in den Vordergrund.

Da Musikinstrumente, die diese Eigenart nicht besitzen, ihre „hörbare“ Position nicht in gleichem Maß ändern, kann sich in beiden Fällen eine unnatürliche räumliche Abbildung ergeben.

Schon einige gute Lautsprecher sind aus diesem Grund völlig zu Unrecht, schlecht bewertet worden.



Flötenklänge in verschiedenen Dynamikstufen

Begriffe aus der Lautsprechertechnik und deren Notation

A	Fläche, m ²	Q_{ES}	Elektrischer Q-Faktor eines Lautsprecherchassis $Q_{ES} = Q_{ms}/r_0 - 1$
a	Membranradius	Q_E	Wirksamer Q _{ES} eines Lautsprecherchassis $Q_E = Q_{ES} \times (R_L + R_X)/R_L$
a	Verhältnis von V _{AS} /V _B	Q_{ms}	Mechanischer Q-Faktor eines Lautsprecherchassis $Q_{ms} = \frac{f_s \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1}$ f ₁ und f ₂ sind die Frequenzen bei denen die Lautsprecherimpedanz den Wert $\sqrt{r_0} \times R_L$ erreicht
B	Magnetische Flußdichte in Tesla, T, 1 Tesla = 10 ⁴ Gauss	Q_{TS}	Totaler Q-Faktor eines Lautsprecherchassis $Q_{TS} = (Q_{ms} \times Q_{ES}) / (Q_{ms} + Q_{ES})$
Bl	Kraftfaktor, das Produkt aus Flußdichte im Luftspalt und wirksamer Länge des Schwingspulendrahtes Beispiel 1,5 T x 17,33 m ⇒ 2,6 N/A Der Lautsprecher wird waagrecht auf einen Tisch gelegt. Ein Strom der durch die Schwingspule fließt erzeugt eine Kraft die ein bestimmtes Gewicht auf der Membran ausbalanciert $BL = mg/\text{Ampere}$ z. B. $BL = 26 \text{ N}/\text{Ampere} = 2,65 \text{ kg}/\text{Ampere}$	R	Gleichstromwiderstand in Ω
C	Schallgeschwindigkeit 343,4 m s ⁻¹	R_L	Gleichstromwiderstand der Schwingspule
C_{ms}	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung in mN ⁻¹ $C_{ms} = \frac{1}{4 \pi^2 \times f_s^2 \times M_{mD}}$	R_X	Externe Widerstande, Kabel, Frequenzweichen etc
F	Kraft in Newton, N	r₀	Z _m /R _L
f	Frequenz, Hz	S, A	Fläche in m ²
f_B	Helmholtzresonanzfrequenz eines Baßreflexgehäuses	S_D, A_D	Membranfläche
f_c	Resonanzfrequenz eines eingebauten Lautsprechers	SPL	Sound pressure level, Schalldruckpegel, meistens Watt/m
f₀, f_s	Freiluftresonanzfrequenz eines Lautsprechers	V_{AS}	$\rho_0 \times c^2 \times S_D^2 \times C_{ms}$, Luftvolumen mit gleicher Federsteife wie die der Membranaufhängung
f₃	Frequenz bei der ein System nur noch die halbe Leistung (-3 dB) abgibt	Z	Impedanz oder Wechselstromwiderstand (Nennscheinwiderstand), frequenzabhängig, Ω
g	Gravitationskonstante, 9,81 m s ⁻²	Z_m	max Impedanz eines Lautsprecherchassis bei der Resonanzfrequenz f _s , Ω
h	System-Abstimmungsverhältnis, f _B /f _s		
I	Strom in Ampere A		
l	Länge des Schwingspulendrahtes		
L	Induktivität, mH, milli Henry		
m	Masse in kg		
M_{mD}	Gesamte bewegte Masse inklusive mitschwingender Luftmasse $M_{mD} = \frac{m}{\left(\frac{f_s}{f_0}\right)^2 - 1}$ Eine bekannte Masse m wird auf der Membran befestigt, aus der alten und der neuen Resonanzfrequenz läßt sich M _{mD} errechnen		
η₀	Referenzwirkungsgrad in %		
ω	(Omega) = 2 π f		
P	Leistung in Watt		
ρ	Spezifische Dichte der Luft 1,189 kg m ⁻³		

Berechnungsgrundlagen

Die Qualität einer Lautsprecherbox ist abhängig von:

1. der Qualität des Gehäuses
2. der Qualität der Chassis
3. der Qualität der Frequenzweiche
4. der richtigen Bedämpfung

Gehäusematerial

Einfluß der Gehäusematerialien

Über Gehäusematerialien ist schon viel, vor allem leider Falsches, geschrieben worden. Deshalb hier eine knappe Zusammenfassung:

Gehäusematerialien sind hinsichtlich folgender Eigenschaften zu untersuchen:

- a) Schalldurchlässigkeit
- b) Schallabstrahlung durch Abstrahlung Materialschwingungen
- c) Schwingungszeit

und dies hauptsächlich hinsichtlich ihres Einflusses auf die Klangqualität.

Es gibt einige Untersuchungen, die zusätzlich noch den Kostenfaktor berücksichtigen, der sogar spätere Transportkosten berücksichtigt usw., mit dem Untersuchungsziel der günstigsten Preis-Qualitätsrelation.

Da wir jedoch immer das Optimum im Auge haben, berücksichtigen wir nur die oben genannten Parameter und beschränken uns gleichzeitig auf das klassische Holzmaterial.

Es muß noch vorweggeschickt werden, daß natürlich folgende Grundprinzipien des Gehäusebaues immer berücksichtigt werden müssen, da sie ebenfalls Einfluß auf die zu untersuchenden Parameter haben.

- Festigkeit und Gründlichkeit der Verbindungen
- 0 Die Geometrie des Gehäuses
- die Größe der Schallwand.

Alle drei Punkte müssen natürlich stets optimal gewählt werden.

Die Meßmethodik

Mathews arbeitet in seinen Untersuchungen mit dem Young-Faktor (Elastizitätsmodul) als vergleichendes Element. Er experimentiert dabei jedoch mit isolierten Brettern. Wir sind der Meinung, daß es sinnvoller ist, Messungen an kompletten Gehäusen vorzunehmen, vor allem deshalb, weil enorme Wechselwirkungen zwischen den Gehäusewänden auftreten.

zu a)

Die Schalldurchlässigkeit ist abhängig von der Dichte gemäß Tabelle 1.

Es ist zu erkennen, daß der Unterschied nicht allzu groß ist; 5,5 dB bei dreifacher Dichte.

zu b)

Die Schallabstrahlung der Gehäusewände entsteht bei direkter Erregung durch den Lautsprecher sowie durch mechanische Selbsterregung durch Resonanzen des Materials. Also spielt die innere Eigendämpfung eine große Rolle bei der Unterdrückung von Eigenresonanzen des Holzes, denn Hölzer mit geringer innerer Dämpfung neigen sehr viel eher zum Schwingen, das heißt, daß nur ein kleiner Anteil der Schwingungsenergie durch Molekülreibung vernichtet wird. Der Q-Faktor vermag das Maß der inneren Dämpfung anzugeben.

Es ist festzustellen, daß Preßspan mit niedrigerem Q-Faktor und relativ hoher Dichte erste Wahl für Lautsprechergehäuse ist, entgegen anderen weitverbreiteten Ansichten.

Bei verglichenen Messungen zwischen direkt abgestrahltem Schall und dem Schallanteil der durch die Gehäuserückwand entsteht, wurde folgende Überraschung festgestellt:

Der Unterschied beträgt nur 10 dB bei gewissen Frequenzen (100 Hz, 700 Hz.)

Dieser hohe rückwärtige Schallanteil wird noch verstärkt durch:

1. materialbedingte Eigenresonanz der Rückwand
2. Resonanz des eingeschlossenen Luftvolumens
3. Wechselwirkung zwischen der Masse der Gehäusewand mit der Luftpolstersteife des eingeschlossenen Luftvolumens.

Eine Gehäusewand hat eine Serie von Resonanzen in allen drei Achsen.

Die verschiedenen Resonanzen ergeben entweder Peaks oder Einbrüche im gesajnten Frequenzverlauf der Box.

zu c)

Bei den Resonanzfrequenzen ist also eine Gehäusewand schalldurchlässiger.

Darüberhinaus ist bei jeder Resonanzfrequenz eine Nachschwingzeit feststellbar, die in etwa abhängig ist von dem Q-Faktor

Bei vergleichenden Messungen konnte festgestellt werden, daß gerade das Nachschwingen am meisten die Klangqualität beeinflusste.

Hierbei verhielt sich der Effekt umgekehrt zur Frequenz. Sehr gut erkennbar war das Schwingen der Wände ab Frequenzen unterhalb 200 Hz.

Ein weiterer Einfluß von Gehäuseschwingungen wird fast immer vernachlässigt.

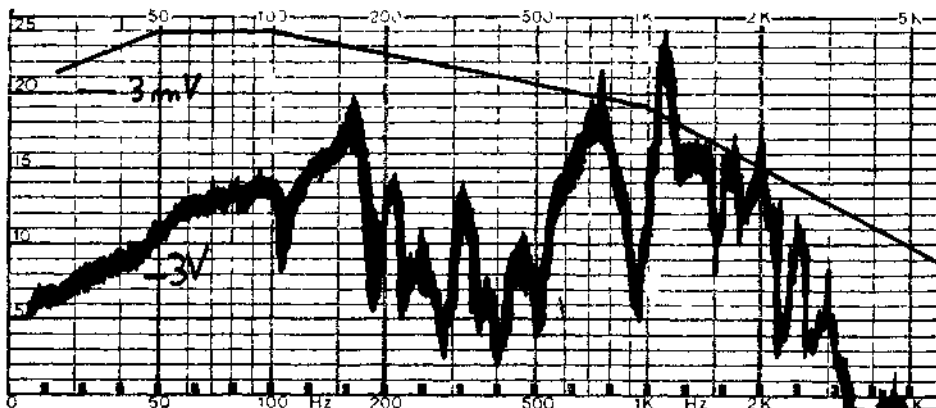
Es werden nämlich in die Schwingspule von Hochtöner und Mitteltöner Spannungen induziert, die deren Klang verfälschen, (s. Abb.)

Das heißt es sind 3 mV an den Klemmen des Hochtöners meßbar bei 3 V am Baßlautsprecher. Diese 60 dB erscheinen vernachlässigbar, sind es aber nicht, vor allem in Anbetracht der Kurvenform der induzierten Spannung.

Zusammengefaßt muß wieder einmal deutlich darauf hingewiesen werden, wie wichtig die Kontrolle der Gehäuseschwingungen ist.

Maßnahmen zur Verbesserung

1. Entkopplung des Baßlautsprechers von der Schallwand wie es KEF seit einiger Zeit vormacht. Dieses Verfahren ist erheblich optimierbar. (Anfragen ab Frühjahr 1983).
2. Versteifungsleisten oder -ringe an den Gehäusewänden
3. Verbindungsleiste von der Schallwand zur Rückwand an der Stelle der Schwingknoten.
4. Bestreichen der Gehäuseinnenwand mit Bitumen.
5. Sandwich-Bauweise



Geschlossene Box

Ähnlichkeiten unerwünscht?

Es gibt geschlossene Lautsprechergehäuse, Schallwände, Baßreflexlautsprecher, Transmissionsline Gehäuse, Hörner, eine Reihe exotisch anmutender Kombinationen wie z. B. den Karlson Coupler. Ebenso wird viel darüber diskutiert welches der unterschiedlichen Gehäuse die besten Ergebnisse er-mögliche.

Tiefere oder „satte“ Baaase, mehr Dynamik, besserer Wirkungsgrad, sauberes Impulsverhalten sind einige der Begriffe. Man gewinnt den Eindruck, es lägen Welten zwischen den unterschiedlichen Möglichkeiten.

Eigentlich erstaunlich, auf der einen Seite ist ein Lautsprecher, auf der anderen Seite ist immer die gleiche Luft mit genau bekannten Eigenschaften. Offensichtlich werden diese Eigenschaften von den verschiedenen Gehäusetyphen auf unterschiedliche Weise genutzt. Argerlicher Weise sind die Ergebnisse zwar deutlich hörbar, die Vorgänge selbst dagegen unsichtbar, es ist daher nicht uninteressant, diese Eigenschaften der Luft und die Funktionsweise der verschiedenen Lautsprechergehäuse zu kennen.

Die Luft ist ein Gasgemisch mit einer spezifischen Dichte von 1,189 Kilogramm pro Kubikmeter.

Das heißt, die Luft hat eine Masse. Masse ist die Eigenschaft jeder Materie, träge und schwer zu sein. Gleichzeitig ist die Luft als Gasgemisch elastisch, also komprimierbar.

Mit Trägheitskräften „wehrt“ sich Materie gegen Beschleunigung, mit Elastizitätskräften versucht sie ihre ursprüngliche Lage wieder einzunehmen.

Nimmt man ein Materieteilchen (z. B. Gasmolekül) und bringt es durch eine Kraft von außen aus seiner Ruhelage, so wird es, wenn die Kraft wegfällt eine Zeitlang um diese Ruhelage hin- und herpendeln. Es schwingt.

Was im Kleinen gilt, gilt meistens auch im Großen. Bringt man eine elastisch aufgehängte Lautsprechermembran aus ihrer Ruhelage, so wird sie in einer „abklingenden“ Schwingung in ihre Ruhelage zurückkehren. Die Frequenz mit der diese Schwingung erfolgt heißt Resonanzfrequenz und läßt sich errechnen.

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{C \cdot M}}$$

Dabei ist

M die bewegte Masse in Kilogramm

C die Nachgiebigkeit (Compliance) in m pro Newton (N) 1 Kilogramm entspricht 9,81 N

So hat ein Lautsprechersystem mit einer effektiven bewegten Masse von 16 g und einer Nachgiebigkeit von 0,00145 m/N eine Resonanzfrequenz von 33Hz.

Baut man einen solchen Lautsprecher in ein Gehäuse ein, so addiert sich zu einer Federsteife der Membranaufhängung die Federsteife der Luft, die im Gehäuse eingeschlossen ist. Die Federsteife der Kombination wird größer. Damit muß sich die Resonanzfrequenz ändern. Wenn z. B. die Aufhängung der Membran und das Luftvolumen die gleiche Federsteife haben ergibt sich:

$$C_{MS} = \frac{1}{\text{Federsteife}}$$

bei doppelter Federsteife ist:

$$\frac{1}{2 \cdot \text{Federsteife}}$$

für die Resonanzfrequenz gilt jetzt:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{2 C \cdot M}}$$

die Resonanzfrequenz erhöht sich um den Faktor $\sqrt{2}$

Dieses Luftvolumen, dessen Federsteife gleich der Federsteife der Membranaufhängung ist, heißt VAS und errechnet sich:

$$V_{AS} = \rho_0 c^2 S_D^2 C_{MS}$$

ρ Dichte der Luft 1,189 kg/m³

c Schallgeschwindigkeit 343 m/s

S_D Membranfläche m²

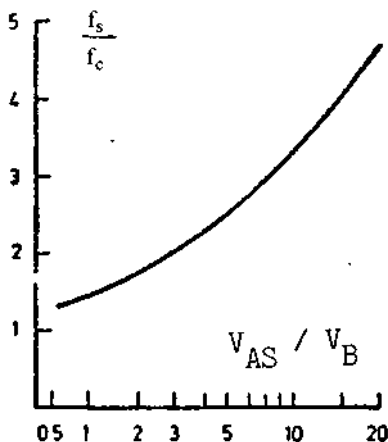
C_{MS} Nachgiebigkeit der Membranaufhängung m/N

$$1,189 \cdot 117649 \cdot (0,009 \text{ m}^2)^2 \cdot (0,00102 \text{ m/N}) = 11,55 \text{ l} = 0,01155 \text{ m}^3$$

Die Resonanzfrequenz jedes Lautsprechersystems in jedem Gehäuse läßt sich jetzt ebenfalls berechnen:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{C_{\text{Membran + Luft}} \cdot M_{\text{Membran}}}}$$

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_{Box}} + 1}$$

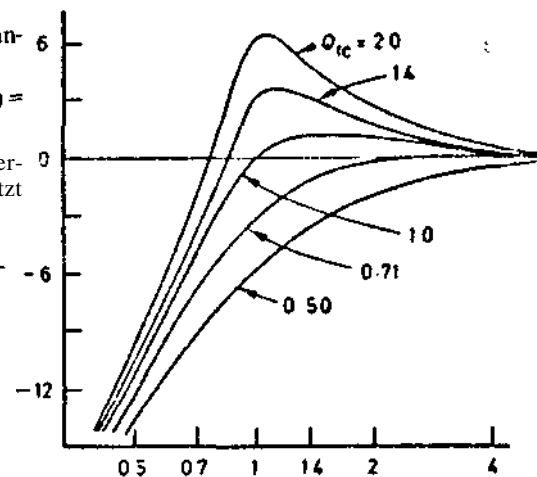
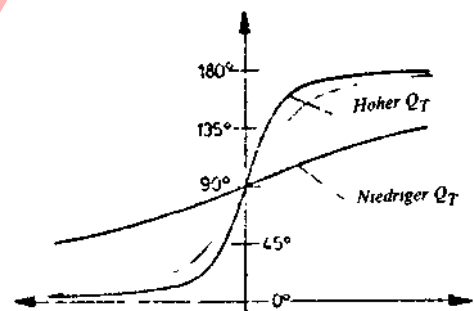


Änderung der Resonanzfrequenz beim Einbau in ein geschlossenes Lautsprechergehäuse.

Damit allein ist jedoch noch nichts gewonnen, denn bisher ist noch nicht bekannt welchen Schalldruck ein eingebauter Lautsprecher bei dieser Frequenz erzeugt. Der Schalldruck bei höheren Frequenzen wird vom Hersteller in dB/Watt/1 m Abstand angegeben. Folgt man der Forderung nach linearem Frequenzgang, so muß der Lautsprecher bis zu seiner Resonanzfrequenz diesen Schalldruck erzeugen.

Der Freiluft Q_T eines Lautsprechers gibt das Verhältnis von Schalldruck bei Resonanzfrequenz f_0 zu Schalldruck bei höheren Frequenzen an.

Außerdem gibt der Q-Faktor Aufschluß über den Frequenzgang, das Ausschwingverhalten und den Phasenverlauf im Bereich tiefer Frequenzen.



Schalldruck P in Abhängigkeit verschiedener Q_T

Der Q-Faktor ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von mechanischer Schwingung und elektrischer Bedämpfung. Die Schwingung der Membran alleine ist „unterbedämpft“ der Q-Faktor daher hoch, die Membran überschwingt sehr stark und außerdem nur in einer Frequenz.

Mit Hilfe des Antriebes, also der Schwing-spule in einem Magnetfeld, lassen sich der Lautsprechermembran auch Schwingungen anderer Frequenzen „aufzwingen“, ebenso ist der Antrieb in der Lage, die Membran zu bremsen, das heißt, die Schwingung zu bedämpfen.

Verbindet man die Anschlußklemmen eines Lautsprechers elektrisch leitend, so läßt sich die Membran deutlich schwerer aus ihrer Ruhelage bringen und kehrt langsamer zurück. Dieser Effekt ist besonders bei großen Baßlautsprechern sehr gut spürbar.

Diese Bedämpfung ist abhängig von der Länge des Schwingspulendrahtes l und der Stärke des Magnetfeldes B. Das Produkt beider Werte ergibt des „Kraftfaktor“ des Antriebes.

Das Ergebnis dieses Effektes will auf den ersten Blick nicht so recht einleuchten. Je stärker der Antrieb eines Lautsprechers ist, um so weniger Schalldruck wird er bei seiner Resonanzfrequenz erzeugen.

Auf der anderen Seite muß der Antrieb stark genug sein, um die, mit steigender Frequenz ebenfalls steigenden Trägheitskräfte der Membranmasse zu überwinden.

Baut man einen Lautsprecher in ein Gehäuse ein, so steigt die Resonanzfrequenz an, damit werden aber auch die Trägheits- und Elastizitätskräfte größer, der Antrieb kann die Schwingung nicht so gut bedämpfen und der Q-Faktor wird größer. Und zwar gilt:

$$f_s / f_c = Q_{ts} / Q_{tc}$$

f_s Freiluftresonanzfrequenz

f_c Einbauresonanzfrequenz

Q_{ts} Freiluft Q-Faktor

Q_{tc} Einbau Q-Faktor

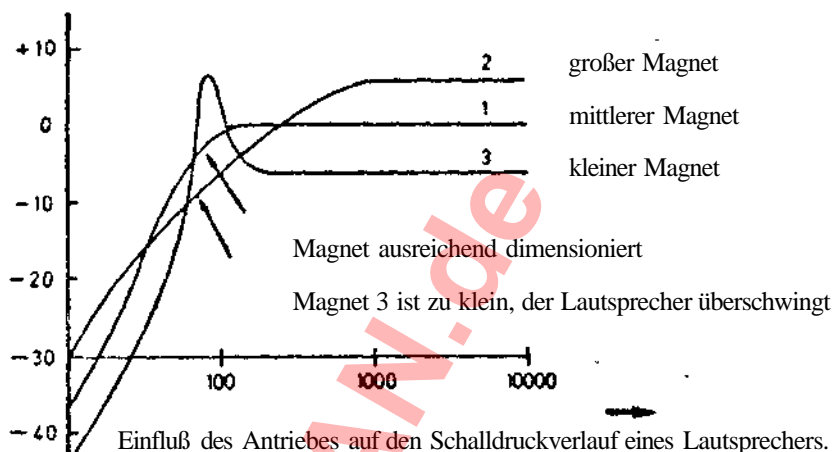
Damit lassen sich für jeden Lautsprecher in jedem geschlossenen Gehäuse die Resonanzfrequenz und der erzeugte Schalldruck ermitteln.

Hat der Q-Faktor des eingebauten Lautsprechers einen Wert von 1, so bedeutet das, daß bis hinab zur Resonanzfrequenz linear Schalldruck erzeugt wird. Eine Verkleinerung des Gehäusevolumens führt zu einer Baßüberhöhung, sowie deutlich hörbarem unkontrollierten Schwingen der Membran, da der Antrieb mit den entstehenden Kräften nicht mehr fertig wird. Eine Vergrößerung des Gehäusevolumens führt zu einem verbesserten Ausschwingverhalten, bei einem leichten Schalldruckverlust.

Hier trennen sich Lautsprecher mit starken Antrieben in großen Gehäusen von denen, die mit unterdimensionierten Magneten in recht kleinen Gehäusen zwar laute, aber hoffnungslos unsaubere Baßwiedergabe erzielen.

Dünne Lautsprecherkabel und andere Ohmsche Widerstände in der Zuleitung gehören ebenfalls hierher, da sie unter anderem auch den Q-Faktor verändern.

Darüberhinaus wirken diese Widerstände als Spannungsteiler und reduzieren die Leistung des Lautsprechers im oberen Frequenzbereich. Bei 4 Ohm Lautsprechern können sie praktisch den Magneten halbieren, ein trauriges Bild, zumindest für die Ohren.



$$Q_{\text{Total}} = \frac{Q_{\text{mech}} \cdot Q_{\text{elektr}}}{Q_{\text{mech}} + Q_{\text{elektr}}} \quad Q_{\text{elektr}} = Q_{\text{Antrieb}} \times \frac{R_{\text{Lautspr.}} + R_{\text{Leitung}} + R_{\text{Weiche}}}{R_{\text{Lautspr.}}}$$

Beispiel: Gutes Kabel und geringer Widerstand der Weiche

$$\frac{4 \Omega + 0,5 \Omega}{4 \Omega} = 1,125 \Rightarrow \frac{2,8 \cdot (0,4 \cdot 1,125)}{2,8 + (0,4 \cdot 1,125)} = 0,388$$

Bei schlechtem Kabel und hohem Widerstand der Weiche

$$\frac{4 \Omega + 4 \Omega}{4 \Omega} = 2 \Rightarrow \frac{2,8 \cdot (0,4 \cdot 2)}{2,8 + (0,4 \cdot 2)} = 0,622$$

Unter Einbeziehung aller Widerstände (z. B. Frequenzweiche) sollte ein Gehäusevolumen so dimensioniert sein, daß sich ein Q-Faktor von 0,6 bis 0,9 ergibt. Will man einen hohen Wirkungsgrad bis zu sehr tiefen Frequenzen aufrechterhalten, werden die benötigten Gehäuse sehr groß.

quenz hat, so müßte doch die Nachgiebigkeit der Luft im Gehäuse größer werden, da die Luft aus dem Tunnel austreten kann.

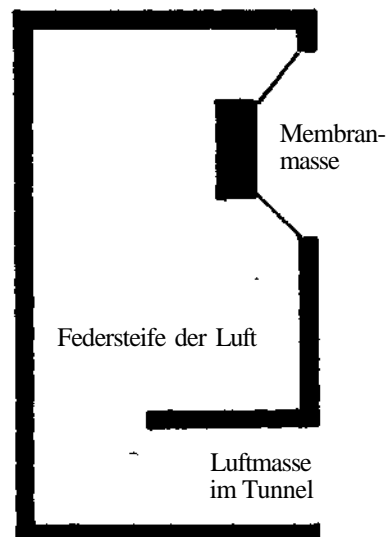
Bassreflex-Prinzip

Mit dem Bassreflexprinzip wird auch die von der Membranrückseite abgestrahlte Schallenergie genutzt. Theoretisch ergibt sich so die doppelte Leistungsfähigkeit, also ein Gewinn von 3 dB bei gleicher Gehäusegröße, oder die halbe Gehäusegröße bei gleicher Leistung.

Die Grundidee ist einfach. Da die Luft im Gehäuse eine bestimmte Federsteife hat, wird sie, mit einer Masse verbunden, schwingen. Eine solche Masse kann auch eine Luftmasse sein, die Resonanzfrequenz ist abhängig von der Größe dieser Masse.

Eine interessante Erscheinung zwingt hier allerdings dazu, das Medium Luft etwas genauer zu betrachten.

Baut man einen Lautsprecher in ein geschlossenes Gehäuse ein, so steigt dessen Resonanzfrequenz. Versieht man das Gehäuse jetzt mit einem Tunnel, so daß diese Kombination eine ähnliche Resonanzfre-



Eigenartigerweise behält aber der Lautsprecher seine höhere Resonanzfrequenz bei. Offensichtlich kann die Luft doch nicht so wie sie will. Ursache eines solchen Verhaltens ist meistens die Existenz von Widerständen.

In diesem Fall müßte ein solcher Widerstand die Luft daran hindern, durch den Tunnel aus- oder einzutreten. Da man bei sehr

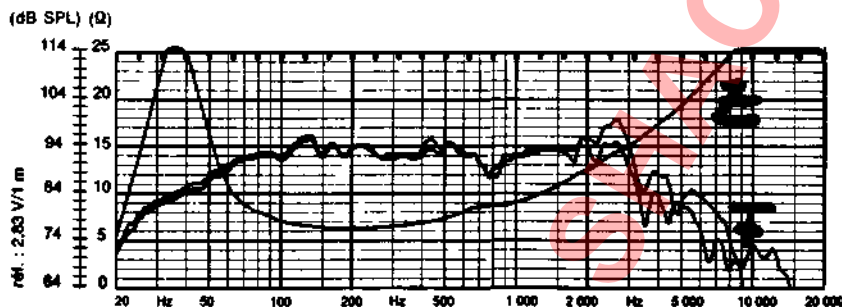
langsamen Bewegungen der Membran deutlich spüren kann, wie die Luft durch den Tunnel ein- und austritt, müßte dieser Widerstand darüber hinaus auch frequenzabhängig sein.

Aus der Elektrotechnik sind verschiedene Widerstände bekannt:

Der Gleichstromwiderstand R in Ohm
Die Impedanz Z in Ohm.

Die Impedanz, auch Wellenwiderstand genannt, ist frequenzabhängig. Vergleicht man bei einem Lautsprecher die Werte für den Gleichstromwiderstand mit denen des Wellenwiderstandes, also der Impedanzkurve, so sieht man, daß die Werte nur über einen sehr kleinen Bereich ähnlich sind. Im übrigen Bereich sind die Werte für Z größer.

Die Impedanz besteht aus einem „realen“ Wirkwiderstand, an dem Leistung verbraucht wird und einem „imaginären“ Blindwiderstand der gegenüber Wechselströmen, besser Wechselspannungen, wirksam wird, allerdings ohne Leistung zu verbrauchen.



Typischer Impedanzverlauf eines 25 cm Baßlautsprechers $R = 6,5 \Omega$

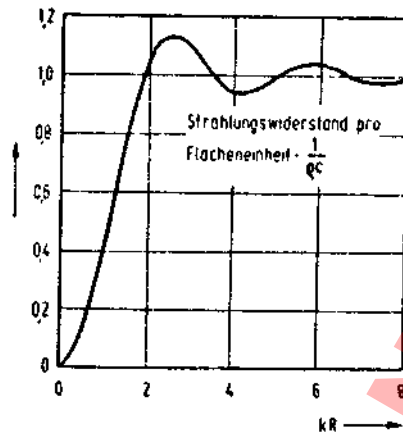
Die Impedanzkurve eines Lautsprechers zeigt diesen Effekt.

Im Bereich der Resonanzfrequenz zeigt sich eine mehr oder weniger ausgeprägte Überhöhung der Impedanzkurve, der Widerstand steigt bis zur Resonanzfrequenz an und fällt dann ebenso wieder ab. Offensichtlich besteht hier ein Zusammenhang. Da sich der Gleichstromwiderstand der Schwingspule nicht ändert, muß die Ursache im schwingungsfähigen System aus Masse und Feder liegen.

Ebenso wie in der Elektrotechnik, gibt es, auch in der Akustik und der Mechanik, reale, also Wirkwiderstände und imaginäre Blindwiderstände.

Eine elektrische Spannung, die eine Lautsprechermembran in Bewegung versetzen soll, „sieht“ alle diese Widerstände.

Da sowohl Masse, wie auch Elastizität, reine Blindwiderstände darstellen, an denen keine Leistung verbraucht wird, würde ein schwingendes System, einmal angeregt, unendlich lange schwingen. Das ist allerdings nicht der Fall, da grundsätzlich Wirkwiderstände mit im Spiel sind. Der mechanische Reibungswiderstand im Lautsprechersystem ist recht gering; wie verhält es sich mit dem Strahlungswiderstand der Luft?



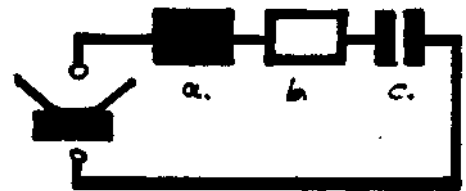
Strahlungswiderstand pro Flächeneinheit einer einseitig abstrahlenden Kreiskolbenmembran in unendlich großer Schallwand als Funktion von kR (k = Kreiswellenzahl, R = Kolbenradius). (Nach Meyer und Neumann, *Physikalische und Technische Akustik*, Vieweg & Sohn)

Durch die wachsende Amplitude, also größere Bewegung in der gleichen Zeiteinheit, werden allerdings auch die Massenträgheitskräfte größer, die Blindwiderstände werden zur Resonanzfrequenz hin sehr groß (s. Impedanzkurve).

Was für die Masse der Lautsprechermembran gilt, gilt natürlich auch für die Luftmasse im Baßreflex-tunnel.

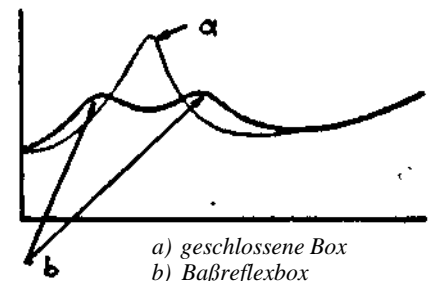
An dem Strahlungswiderstand der Öffnung wird Schallenergie abgegeben, wenn das System schwingt. Die Größe des Strahlungswiderstandes brems hier die Schwingung. Da die Öffnung meist kleiner ist als die Lautsprechermembran, und damit auch die Blindwiderstände, und für den Lautsprecher ist diese Öffnung ein anderer Widerstand, die antreibende Membran sieht bei der Resonanzfrequenz des Baßreflexgehäuses extrem hohe Blindwiderstände und den Strahlungswiderstand der Öffnung.

- a) Luftmasse im Baßreflex-tunnel
- b) Strahlungswiderstand der Reflexöffnung
- c) Federsteife der Gehäuseluft



Diese Widerstände bremsen die Membranbewegung. Bei der Resonanzfrequenz des Gehäuses bewegt sich die Lautsprechermembran fast überhaupt nicht mehr, dennoch wird die gleiche Schallenergie abgestrahlt. Durch diese Widerstände kann auch die Luft im Gehäuse nicht mehr so wie sie will. Die Resonanzfrequenz hat den gleichen Wert wie beim Einbau in ein geschlossenes Gehäuse.

Die reduzierte Membranbewegung zeigt sich in der Impedanzkurve des Lautsprechers in dem Baßreflexgehäuse.



Verringerte Membranbewegung = geringere Blindwiderstände = im Bereich der Resonanzfrequenz.

Damit werden die Vor- und Nachteile des Baßreflexprinzips deutlich.

Der verbesserte Wirkungsgrad verhilft zu etwas handlicheren Gehäuseabmessungen, bei richtiger Abstimmung ergibt sich eine Verbesserung um maximal 2,9 dB, also fast eine Verdoppelung.

Da sich die Membran bei der Resonanzfrequenz fast nicht bewegt, wird die Belastbarkeit des Lautsprechersystems erhöht, ohne die Baßreflexöffnung würde die Membran schon bei geringeren Lautstärken die maximal mögliche Auslenkung erreichen.

Andererseits nimmt die Membranbewegung unterhalb der Resonanzfrequenz des Gehäuses wieder zu, der Blind- und Strahlungswiderstand der Öffnung nimmt rapide ab. Für Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz ist das Gehäuse in zunehmendem Maß „offen“, die Belastbarkeit wird sehr gering.

Durch die angekoppelte Luftmasse entsteht ein weiterer Nachteil. Die Masse ist über die Federwirkung der Gehäuseluft an die Lautsprechermembran gekoppelt. Kommt die Membran zum Stillstand, so wird die Luftmasse noch etwas nachschwingen. In welchem Umfang das geschieht, ist von der Abstimmung des Lautsprechergehäuses abhängig. Ein Baßreflexlautsprecher hat grundsätzlich ein schlechteres Ausschwingverhalten als ein vergleichbarer geschlossener Lautsprecher.

Durch die Abstimmung von Gehäusevolumen und Gehäuseresonanzfrequenz auf den verwendeten Lautsprecher, läßt sich der Frequenzgang der Lautsprechergehäuse-Kombination so beeinflussen, daß bis zu einer tiefstmöglichen Frequenz linear Schalldruck abgegeben wird.

Auch hier sind der Q_T -Faktor sowie das V_{AS} die bestimmenden Größen.

Der Q_T -Faktor bestimmt das Verhältnis von $V_{AS}/V_{GehSuse}$.

Allerdings ergeben sich hier, durch den besseren Wirkungsgrad, andere Werte als für geschlossene Lautsprechergehäuse.

Hat der verwendete Lautsprecher einen Q_T -Faktor von ca. 0,4, so sollte das Gehäusevolumen gleich dem V_{AS} sein: $V_{AS}/V_{Geh} = 1$

Die Resonanzfrequenz des Gehäuses sollte gleich der Resonanzfrequenz des Lautsprechers in diesem Gehäuse sein.

Die Resonanzfrequenz des Gehäuses sollte gleich der Freiluftresonanzfrequenz des Lautsprecherchassis sein.

Mit sinkendem Q_T Faktor wird V_{Box} kleiner als V_{AS} . Gleichzeitig steigt die benötigte Gehäuseresonanzfrequenz an.

Beispiel:

$$Q_T = 0,3 \Rightarrow V_{AS}/V_{Box} = 3; f_{Box}/f_s = 1,5$$

$$Q_T = 0,2 \Rightarrow V_{AS}/V_{Box} = 10; f_{Box}/f_s = 2,2$$

Die Zusammenhänge zwischen Gehäusegröße, Verlusten im Gehäuse und richtiger Gehäuseresonanzfrequenz sind recht verwickelt, daher sind diese Werte nur Anhaltswerte.

Auch Lautsprecher mit Q_T -Faktoren über 0,4 lassen sich in Baßreflexgehäuse einsetzen, hier gerät man allerdings in Bereiche, wo das Ausschwingverhalten sehr zu wünschen übrig läßt.

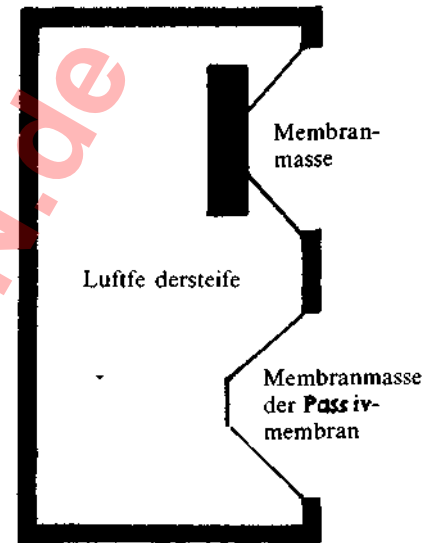
Es gilt hier:

$$Q_T = 0,5; V_{AS}/V_{Geh} = 0,45; f_{LS}/f_{Geh} = 0,8$$

Ratsamer wäre es hier, das Gehäusevolumen etwas kleiner zu wählen und der resultierenden Baßüberhöhung durch Dämpfungsmaterial im Gehäuse zu begegnen.

Ersetzt man die Luftmasse des Baßreflex-tunnels durch eine andere Masse, eine Lautsprechermembran ohne eigenen Antrieb, so ändert das am Prinzip nichts. Da in diesem Fall aber keine Probleme durch die Luftströmung im Tunnel auftreten können, (Pfeif- oder andere Geräusche bei großen Lautstärken und kleinen Tunnelabmessungen) ist das Passiv Radiator System dem herkömmlichen Baßreflexprinzip überlegen.

Die Konstruktion ist einfach. Sind die Resonanzfrequenz des Lautsprechers im richtigen Gehäusevolumen und die benötig-



Berechnung einer Baßreflexbox

Für die Berechnung einer Baßreflexbox werden zuerst die benötigten Werte des Lautsprecherchassis (hier KEF B 200 G) aus dem Datenblatt entnommen.

$$Q_T = 0,37; f_s = 27 \text{ Hz}; C_{MS} = 1,4 \times 10^{-3};$$

$$S_D = 246 \text{ cm}^2 = 0,0246 \text{ m}^2$$

Der Wert für V_{AS} errechnet sich aus-

$$V_{AS} = P_0 \cdot c^2 \cdot S_D^2 \cdot C_{MS}; \quad P_0/c^2 = 139884$$

In diesem Fall'

$$139884 \times 0,0014 \times 0,0246^2 = 0,1185$$

beträgt der Wert für V_{AS} 0,1185 m³ oder 118,5 Liter

Ein Blick in das Diagramm zeigt für $Q_T = 0,37$

$$V_{AS}/V_B \ll 1,5 \Rightarrow V_{AS}/1,5 = V_B; \quad 118,5 : 1,5 = 79$$

Die theoretisch optimale Gehäusegröße wäre demnach 79 Liter.

Die theoretisch optimale Gehäusegröße wäre demnach 79 Liter. Aufgrund der Gehäuseverluste und der Änderungen des theoretischen Volumens durch Dämpfungsmaterial sollte das Gehäuse etwa 10% kleiner werden

Das Nettovolumen der Box beträgt damit ca. 71 Liter.

Jetzt muß f_{Box} gefunden werden¹

Aus dem Diagramm entnimmt man den Wert für h auf der senkrechten Skala rechts

$$h \wedge 1,1 \text{ Freiluftresonanzfrequenz} \times h = \text{Gehäuseresonanzfrequenz}$$

$$27 \times 1,1 = 29,7$$

Das Gehäuse muß auf eine Frequenz von 29,7 Hz abgestimmt werden.

Um die richtige Tunnelgröße zu finden, kann man das Nomogramm benutzen:

Die Werte V_{Box} (71 l) und f_{Box} (29,7 Hz) werden durch eine Linie verbunden, wie es im Nomogramm, mit anderen Werten allerdings, gezeigt ist. Jetzt kann für jeden Tunneldurchmesser die richtige Tunnellänge gefunden werden.

In diesem Fall sind es für einen Tunnel von 7 cm Ø genau 15 cm Länge.

Nach der Formel für den Helmholtz-Resonator läßt sich jeder gefundene Wert rechnerisch kontrollieren

Der mit dem Nomogramm gefundene Wert stimmt also recht genau.

Weiterhin läßt sich mit der Formel zeigen, daß eine Verdoppelung der Tunnelfläche auch eine Verdoppelung der Tunnellänge erfordert, wenn die Gehäuseresonanzfrequenz beibehalten werden soll.

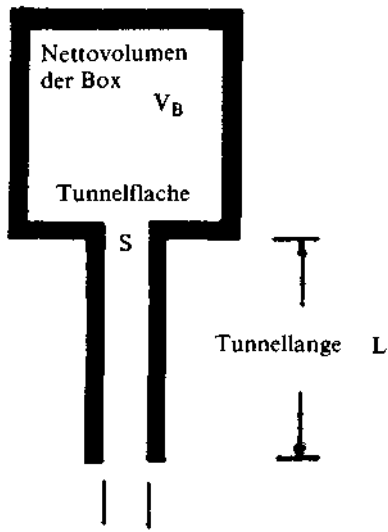
Tunnelfläche 77 cm²;
Tunneldurchmesser 10 cm
Erforderliche Tunnellänge ca. 30 cm.

Die geringen Abweichungen ergeben sich aus der Mündungskorrektur, die vom Durchmesser des Tunnels abhängig ist.

Nach diesem Verfahren läßt sich die Resonanzfrequenz für alle Gehäuse/Tunnel-Kombinationen berechnen.



Abstimmung eines Baßreflexlautsprechers abhängig von Q_T



Tunneldurchmesser $D = 2 R$

- C = Schallgeschwindigkeit
- S = Tunnelfläche in m^2
- L = Tunnellänge in m
- R = Tunnelradius $R = 1/2 D$ in m
- V_{Box} = Nettovolumen der Box in m^3

Gehäuseresonanz frequenz

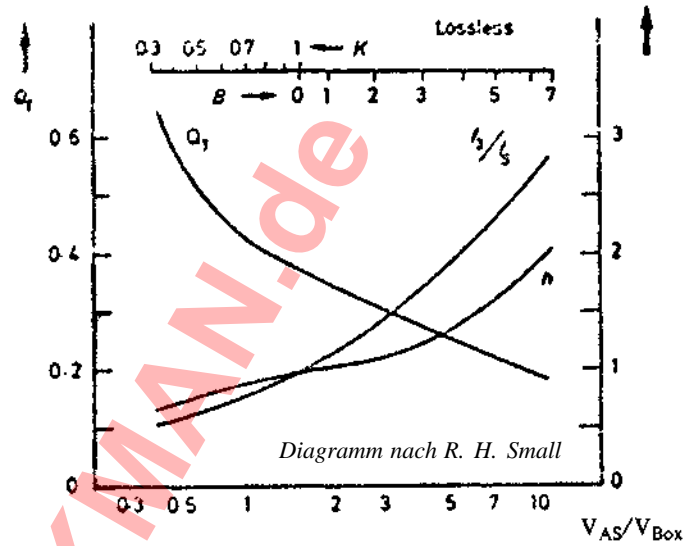
$$f_0 = \frac{C}{2\pi} \times \sqrt{\frac{S}{V_B \times (L + \frac{\pi}{2} R)}}$$

$$\frac{343}{2 \times 3,14} \times \sqrt{\frac{0,00385}{0,071 \times (0,15 + 3,14/2 \times 0,035)}}$$

= 28 Hz

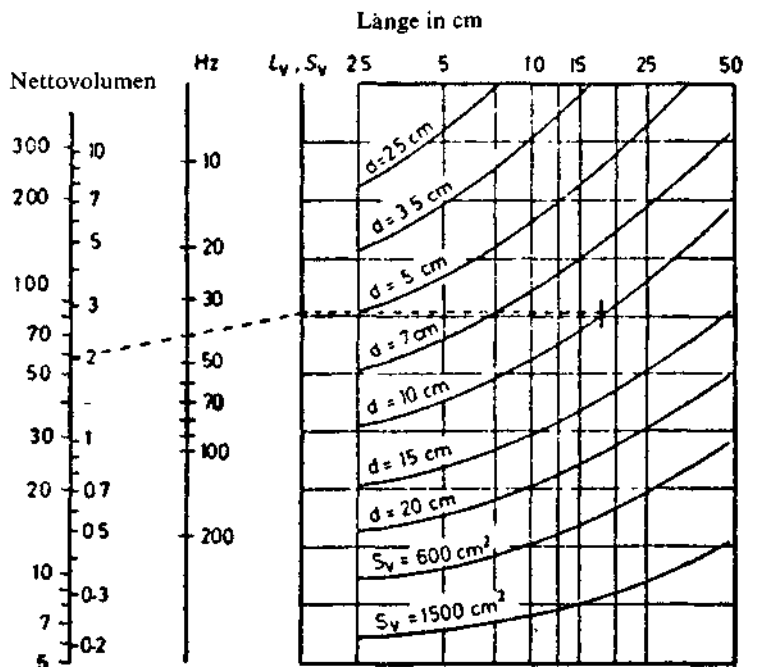
$$\frac{343}{2 \times 3,14} \times \sqrt{\frac{0,0077}{0,071 \times (0,3 + \frac{3,14}{2} \times 0,005)}}$$

= 29,2 Hz

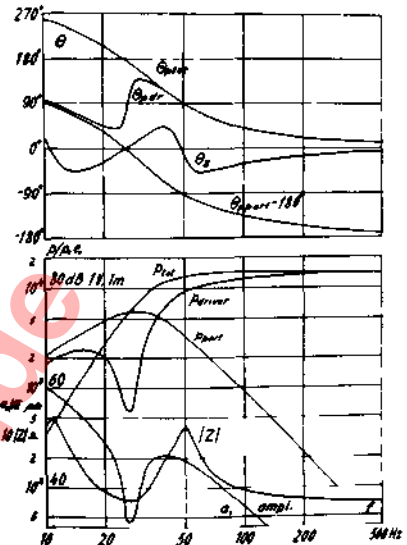
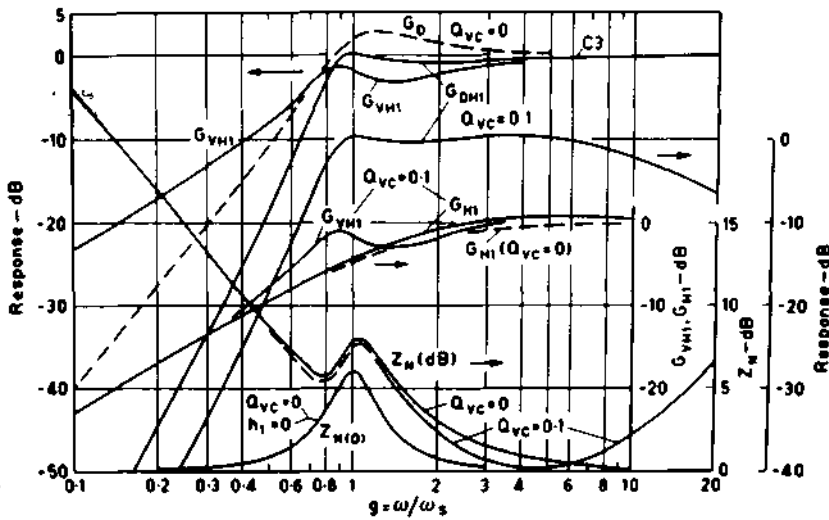


$$h = \frac{\text{Gehäuseresonanzfrequenz}}{\text{Freiluftresonanzfrequenz des Lautsprecherchassis}}$$

$$\frac{f_3}{f_5} = \frac{-3 \text{ db Punkt}}{\text{Freiluftresonanzfrequenz des Lautsprecherchassis}}$$

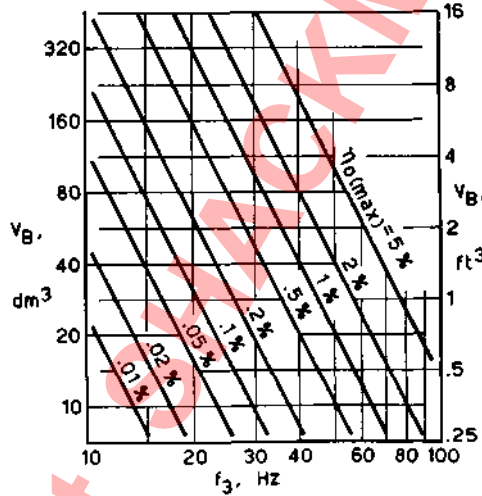
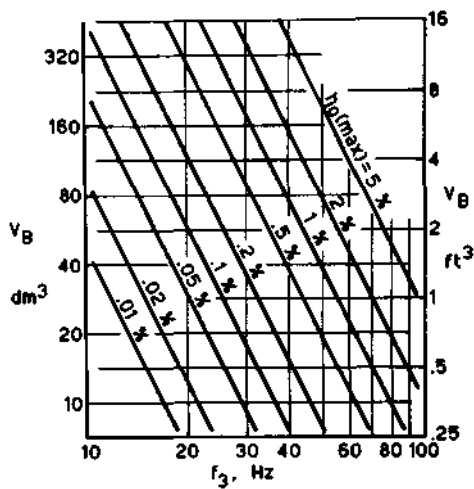


Nomogramm zur Bestimmung der richtigen Tunnelgröße eines Baßreflexgehäuses. Mündungskorrekturen sind bereits eingearbeitet.



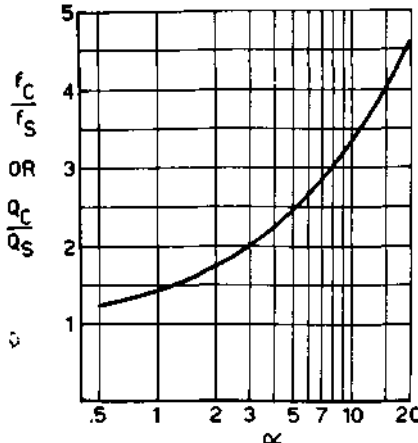
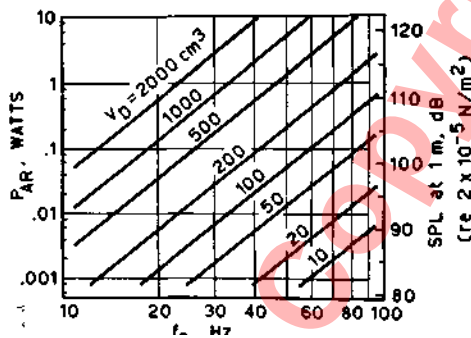
Eine umfassende Berechnung von Baßreflexboxen ist natürlich etwas komplizierter.

Schalldruckfrequenz Aot einer Baßreflexbox. Das Diagramm zeigt daneben die Anteile der Schallabstrahlung von Membran (Driver) und Reflexöffnung, sowie die Impedanzkurve. Das obere Diagramm zeigt den Phasenverlauf.



Die Relation von Gehäusevolumen KBOX ZU Grenzfrequenz und Wirkungsgrad bei geschlossenen Lautsprecherboxen.

Die Relation von Gehäusevolumen KBOX ZU Grenzfrequenz und Wirkungsgrad bei Baßreflexboxen



Das Diagramm zeigt die nötige Volumenverdrängung (Fläche x Auslenkung einer Lautsprechermembran) um eine bestimmte akustische Leistung abzustrahlen, bzw. einen bestimmten Schalldruck zu erzeugen.

Die Änderung der Resonanzfrequenz eines Lautsprecherchassis in Abhängigkeit von $a = (V_{3S}/V_{Bax})$

Eine umfassende Berechnung von Baßreflexboxen ist natürlich etwas komplizierter, dieser Satz ist untertrieben. Die Baßreflexbox ist ein Hochpaßfilter 4ter Ordnung, vergleichbar einem elektrischen Filter. Bei den elektrischen Filtern unterscheidet man gewöhnlich zwischen Butterworth-, Bessel- und Chebyshev-Filtern, die Namen charakterisieren verschiedene Übertragungsfunktionen der Filter (vgl. Frequenzweichen). Bei den Baßreflexboxen ist es ebenso, nur gibt es hier zur Zeit: Butterworth (B4), Bessel- (Be4), Chebyshev- (C4), Quasi Butterworth- (QB3), Superquasi Butterworth- (SQB 3), Sub Chebyshev- (SC4), Boombox- (BB4), Subboombox- (SBB4) und Inter-Order Butterworth- (IB4) Filter und noch einige andere ohne exakte Bezeichnung. Der Frequenzgang ist entweder linear, wie bei den SBB4, QB3, SC4, B4, BE4, IB4 und es werden Chassis mit niedrigem Q* Werten benötigt, oder der Frequenzgang ist wellig mit einer Überhöhung bei der Resonanzfrequenz, BB4, SQB3, C4, wobei Chassis mit hoher Resonanzfrequenz eingesetzt werden.

Aus der letzten Gruppe stammen viele gute Musikerboxen, die Schalldrucküberhöhung kann hier gezielt zur Verstärkung tiefster Töne bestimmter Instrumente eingesetzt werden (E-Baß), aber kaum gute Hifi-Boxen.

Die Unterschiede in der ersten Gruppe liegen in den resultierenden Gehäusegrößen und im Impulsverhalten. Die Darstellung aller Berechnungsgrundlagen würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen, außerdem ist für solche Entwicklungen ein umfangreicher Meßgerätepark notwendig.

Transmission-Line Box

TL Audion

Pos. Stück Maße in mm

1	2	1070 x 477 x 19
2	1	937 x 345 x 19
3	1	406 x 345 x 19
4	1	363 x 20 x 19
5	1	882 x 345 x 19
6	1	153 x 100 x 19
7	2	124 x 100 x 19
8	1	267 x 245 x 19
9	2	110 x 345 x 19
10	1	743 x 345 x 19
11	2	105 x 345 x 19
12	1	458 x 345 x 19
13	2	477 x 345 x 19
14	1	125 x 345 x 19
15	1	65 x 345 x 19
16	2	438 x 20 x 19

Transmission-Line

Auch bei dem TL-Prinzip wird der Strahlungswiderstand, den die Membranrückseite „sieht“ durch Resonanzerscheinungen erhöht.

Wird ein Lautsprecher auf einer Seite mit einem runden oder rechteckigen Rohr verbunden, so kann man feststellen, daß eine bestimmte Frequenz aus dem Rohr besonders laut abgestrahlt wird.

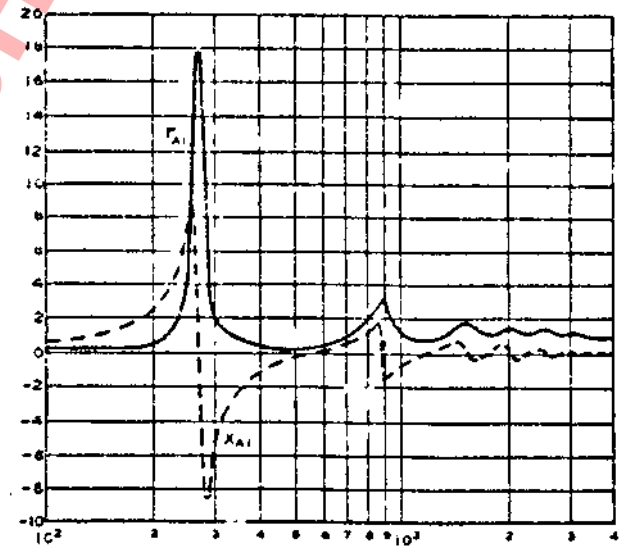
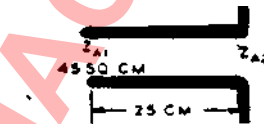
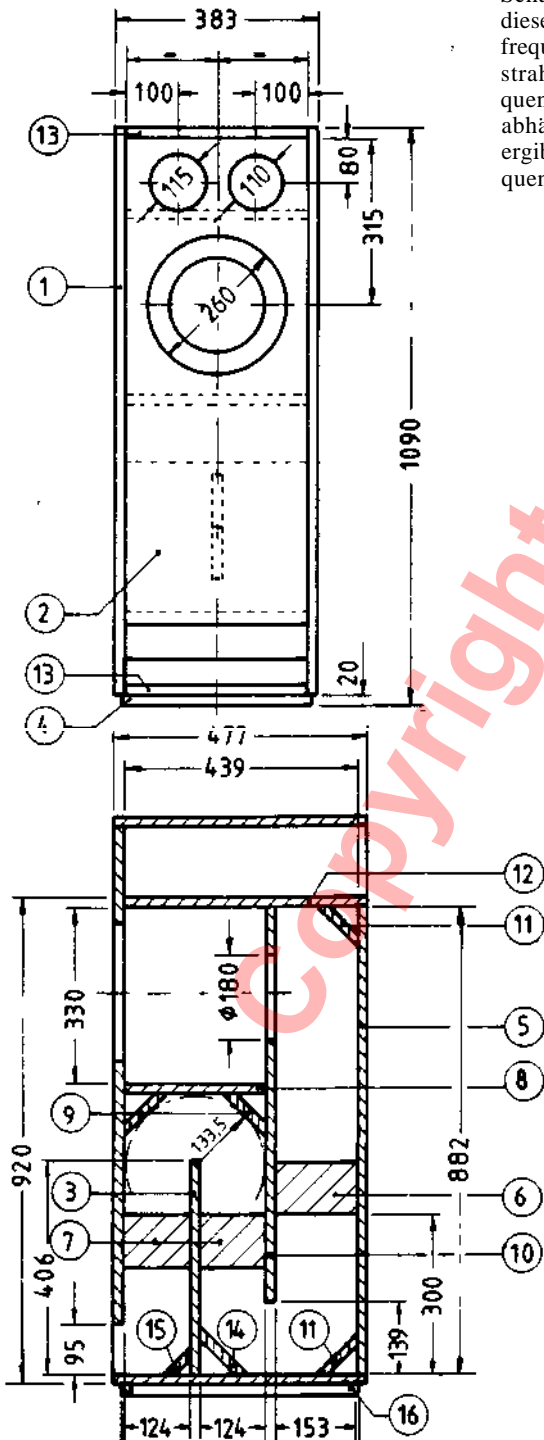
Der Grund dafür liegt in dem frequenzabhängigen Strahlungswiderstand der akustischen Leitung.

In dem Bereich der „Rohrresonanz“ erreichen die Blindwiderstände und der reale Strahlungswiderstand sehr hohe Werte, die Schallabstrahlung ist daher an der Öffnung dieser Leitung, im Bereich der Resonanzfrequenz, sehr viel größer als die Schallabstrahlung der Membran. Die Resonanzfrequenz ist von der Länge der Leitung abhängig, die vierfache Länge der Leitung ergibt die Wellenlänge der Resonanzfrequenz.

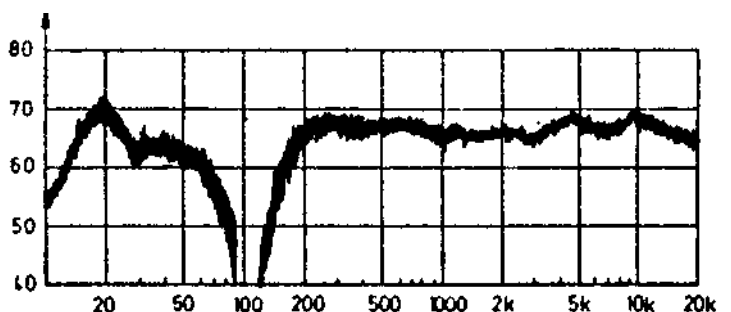
Ebenso wie bei dem Baßreflexprinzip wird hier durch den hohen Widerstand eine Reduktion der Membranbewegung bewirkt, allerdings fehlt hier die zusätzliche Federsteife eines Gehäusevolumens, mit der beim Baßreflexprinzip der Q-Faktor des Lautsprechers optimiert wird. Die Transmission-Line eignet sich zur Abstrahlung einer sehr tiefen Frequenz, allerdings nur einer. Deswegen ist eine Orgel auch meistens recht unhandlich. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an den Lautsprecher und das Verhältnis von Rohrlänge zu der Resonanzfrequenz des Lautsprechers, da ein Frequenzgang, wie in der Abbildung, nicht unbedingt das Kennzeichen eines guten Hifi Lautsprechers ist.

Genau das aber wird passieren, wenn ein Lautsprechersystem mit kräftigem Antrieb an eine ca. 2 m lange Transmission-Line angekoppelt wird!

Der Qt-Faktor des Lautsprechersystems, das an einem Transmission-Line Gehäuse betrieben werden soll, muß zwischen 0,7 und 1 liegen, damit bis zur Resonanzfrequenz hinab der gleiche Schalldruck erzeugt wird. Im Bereich der Freiluftresonanzfrequenz des Lautsprechers und darunter, wird die TL zur Schallabstrahlung genutzt. Aus diesem Grund eignen sich nur wenige Lautsprechersysteme zum Einsatz



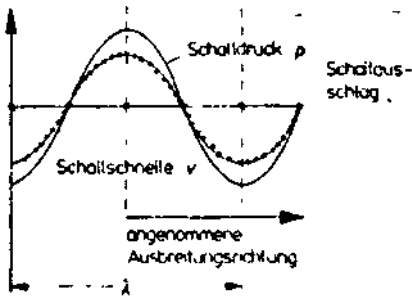
Strahlungswiderstand einer akustischen Leitung nach obigen Maßen.



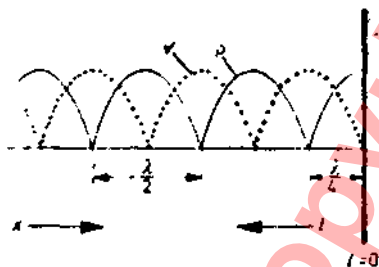
Frequenzgang eines schlechten Transmissionline Lautsprechers

von solchen „echten“ TL Gehäusen, und auch die haben es nicht leicht, da die TL noch andere Eigenarten aufweist. Bei bestimmten höheren Frequenzen zeigt eine solche Leitung ebenfalls Resonanzerscheinungen. Gleichzeitig werden sie Wellenlängen dieser Frequenzen kleiner. Die Frequenz deren Wellenlänge gleich der Rohrlänge ist, wird einmal von der Membranvorderseite und einmal von der Membranrückseite, also gegenphasig, abgestrahlt. Ist die Rohrlänge gleich der Wellenlänge, wird der Schall auch an der TL Öffnung gegenphasig abgestrahlt und hebt den, von der Vorderseite, abgestrahlten Schallanteil vollständig auf.

Diese Frequenzen müssen im Gehäuse absorbiert werden. Durch Reibung an einem Dämpfungsmaterial (realer mechanischer Widerstand), kann einer Schallwelle Energie entzogen werden. Damit ein Reibungswiderstand wirksam werden kann, muß allerdings erst einmal eine Bewegung da sein. Was bewegt sich denn jetzt im TL Gehäuse? Natürlich Luft, aber wo?



Momentdarstellung von Schallausschlag ξ , Schalldruck p und Schallschnelle v in einer ebenen fortschreitenden Welle



Räumliche Verteilung von Schalldruck und Schallschnelle in einer stehenden Welle bei totaler Schallreflexion an einer schallharten Wand (schematisiert)

Eine Schallwelle „unterwegs“ (a) und vor einer schallharten Wand (b).

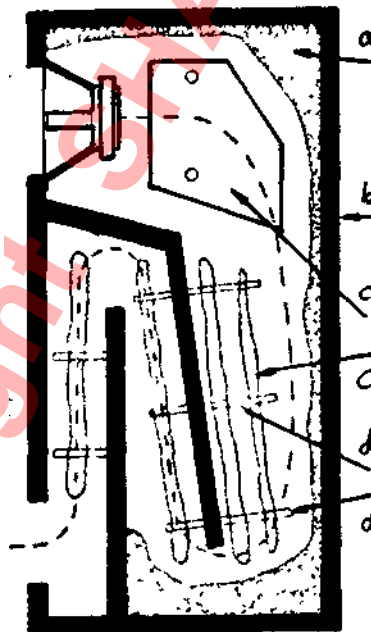
An der Wand sind Druck- und Schnellemaxima um eine viertel Wellenlänge gegeneinander verschoben, die Welle „steht“. Im Inneren eines TL Gehäuses bilden sich solche stehenden Wellen, da auch die Lautsprechermembran eine schallharte Wand ist. Damit läßt sich die Lage der Schnellemaxima für jede Frequenz ermitteln. Die Bereiche maximaler Schnelle sind gleichzeitig die Bereiche in denen das Dämpfungsmaterial diese Frequenz am besten absorbiert.

Größte Schnelle = größte Reibung = maximale Absorbierung

Auch bei noch so überlegter Anordnung des Dämpfungsmaterials in der TL wird grundsätzlich auch etwas Schallenergie der tiefsten Frequenz absorbiert. Gleichzeitig ändert sich innerhalb dieses Materials die Schallgeschwindigkeit. Sie verringert sich um bis zu 50%. Damit ändert sich praktisch die Länge der Leitung und die berechnete Resonanzfrequenz.

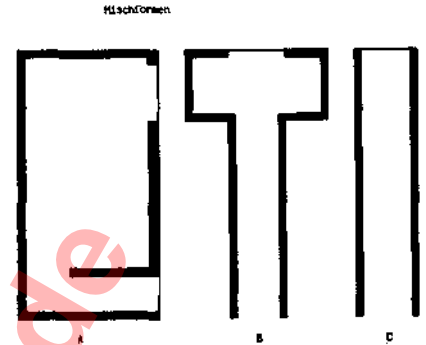
Stellt man nach der Fertigstellung eines TL-Gehäuses fest, daß die Bedämpfung nicht stimmt, so ist jetzt mit Sicherheit die Resonanzfrequenz falsch; das aber heißt Anbauen oder Absägen.

Ein weiterer Effekt macht die Sache noch etwas komplizierter. Ein Teil des Dämpfungsmaterials schwingt in Phase mit der Lautsprechermembran mit. Dadurch erhöht sich die schwingende Masse des Lautsprechersystems. Auch die Luftmasse in der TL schwingt zum Teil mit. Als Ergebnis verringert sich die Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechersystems um einen bestimmten Betrag.



Typischer Transmissionline Lautsprecher

- a) Dämpfungsmaterial (langfaserige Naturwolle, B. A. F.)
- c) Tieffpassfilter absorbieren hohe Frequenzen (Naturwolle, B. A. F.)
- d) lange Nägel zur Befestigung des Dämpfungsmaterials

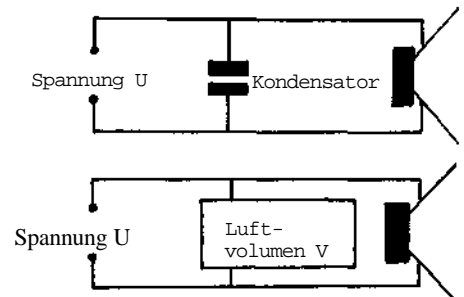


Mischformen

Ob die Konstruktion (b) jetzt noch ein Baßreflexgehäuse oder schon eine Transmission-Line ist, läßt sich schwer sagen.

Auf jeden Fall läßt sich hier die Resonanzfrequenz des Lautsprechersystems und damit der Q-Faktor beeinflussen, wie es bei einem Baßreflexgehäuse der Fall ist. Gleichzeitig zeigt der Tunnel Transmission-Line Effekte im Bereich der sehr tiefen Frequenzen, weil er sehr lang ist. Grundsätzlich zeigt jeder Reflexstunnel diese Effekte. Da der Tunnel aber normalerweise sehr viel kürzer ist, verfärben diese Effekte meistens den Klang im Mitteltonbereich. Eigenartigerweise ist diese Verfärbung bei einigen Lautsprechern hörbar, bei anderen nicht. Woran liegt das?

Das Luftvolumen vor dem Reflexstunnel ist eine Parallelkapazität.



Ähnlich wie in der Schaltung oben der Widerstand des Kondensators zu hohen Frequenzen immer kleiner wird und damit die hochfrequenten Anteile einer angelegten Spannung über den Kondensator abfließen, bevor die den Wirkwiderstand erreichen, arbeitet die akustische Parallelkapazität. Die Luft ist durch ihre Komprimierbarkeit in der Lage akustische Energie zu speichern, ebenso wie ein Kondensator elektrische Energie speichert. Der Umfang in dem ein Luftvolumen Energie speichern kann, ist von der Größe des Volumens und der Frequenz abhängig. Aus diesem Grund müssen kleine Baßreflexgehäuse grundsätzlich mit Dämpfungsmaterial versehen werden, große nur soweit sie parallel Wände haben (Stehwellenbildung). Gleichzeitig sollte der Tunnel möglichst kurz oder noch besser gar nicht da sein (Passiv Strahler), um eine Anregung der Rohrresonanz zu vermeiden.

Oder möglichst lang, soweit die Grundschwingung des Rohrs, also die unterste Rohrresonanzfrequenz, gerade angeregt wird, um Schall abzustrahlen. In diesem Fall müssen nur die Oberwellen dieser Schwingung bedämpft werden. Wie sich gleich zeigen wird, ist das erheblich einfacher.

Der Wert für:

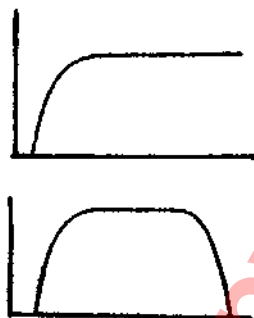
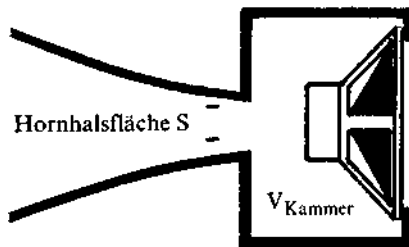
Strahlungswiderstand + Blindwiderstand (Strahlungsimpedanz) multipliziert mit der Fläche des Strahlers dividiert durch die spezifische Schallkennimpedanz

hat für einen Lautsprecher den Höchstwert 1, ebenso an der Halsöffnung eines Hornes, soweit die Hornresonanzfrequenz nicht unterschritten wird.

Für diesen Wert 1 gilt:

$$f_{gr} = \frac{C \cdot S_D}{2 \pi \cdot V}$$

- C = Schallgeschwindigkeit m/s
- S_D = Hornhalsfläche m²
- V = Kammervolumen m³



S = Hornhalsfläche

Einfluß einer Luftkammer zwischen Hörn und Lautsprecher auf den Frequenzgang

F gibt die Frequenz an bei der das Volumen V die Schallabstrahlung aus einem Hörn auf die Hälfte reduziert hat, wenn es zwischen Lautsprecher und Hornhals angebracht wird. Weil hier immer etwas Luft ist, damit sich die Membran überhaupt bewegen kann, hat jedes Hörn eine obere Grenzfrequenz.

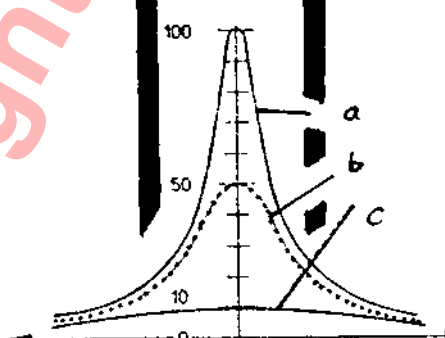
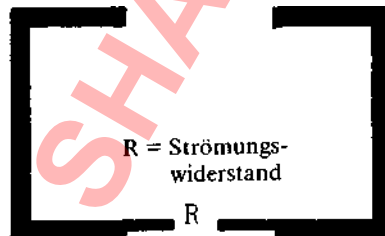
Vergleicht man den Strahlungsimpedanzverlauf eines Hornes mit dem einer TL, so stellt man einen deutlichen Unterschied fest. Hier ergeben sich durch die Resonanzerscheinungen sehr viel größere Werte als 1, damit muß bei diesen Frequenzen auch das Luftvolumen erheblich größer sein, wenn ein Anregung von Schwingungen vermieden werden soll.

Die Impedanzkurve zeigt, daß bei der tiefen Frequenz die größten Werte liegen, was die Sache doppelt schwierig macht. Will man dagegen nur die Oberwellen reduzieren, ist das Ganze schon erheblich einfacher, da sich hier die Werte an 1 annähern.

Eine Verkleinerung der Fläche S₂ auf S₁, wie im Bild gezeigt, führt über:

Strahlungsimpedanz x Fläche / Schallkennimpedanz

zur Verringerung der TL Effekte über den ganzen Bereich, und als mechanischer Strömungswiderstand, wenn S zu klein wird, zur Beeinträchtigung der Baßreflexfunktion.



Beeinträchtigung der Resonanzeffekte

Strömungswiderstand gering

Strömungswiderstand sehr hoch



1 h

Dämmstoffe

Der Einsatz von Dämmstoffen in einem Lautsprechersystem entscheidet maßgeblich den Klang des Lautsprechersystems!

Gerade besonders gute Lautsprechersysteme müssen beim Einbau in ein fehlerhaft bedampftes Gehäuse ihre hervorragende Verzerrungsarmut und Linearität kompromittieren. Und trotzdem ist das Thema Dämmstoffe eines der am sträflichsten vernachlässigten Gebiete der Lautsprechertechnik.

Deshalb auch hierzu einige Worte!

1. Wahl des Dämmstoffes

Es gibt verschiedene Materialien, die sich hinsichtlich

- a) der Frequenz-Selektivität
- b) der Dämpfungsgüte unterscheiden.

Das heißt, verschiedene Materialien dämpfen unterschiedliche Frequenzen mehr oder weniger gut (a) oder sie tun dies mehr oder weniger stark (b). Sofort einsichtig ist, daß die Materialien, die beste Ergebnisse liefern, die höchste Selektivität und höchste Güte aufweisen.

Es gibt folgende Dämmstoffe:

1. Steinwolle und Glaswolle
2. B.A.F. Wadding
3. Pritex, hochselektiver Schaumstoff
4. langfaserige Naturwolle
5. sogen. Stoftwatte oder Stopfwolle.

Zu Punkt 1. kann schlicht gesagt werden, daß das Material ungeeignet ist, da es kaum frequenzspezifische Dämpfung aufweist. Es ist zwar relativ preiswert, aber um den gleichen Dämpfungsgrad zu erreichen, muß erheblich mehr aufgewendet werden als z. B. von B.A.F. oder Pritex, sodaß es letztendlich viel teurer wird. Zudem ist die Füllung einer Box mit Dämmstoff gewissen Grenzen unterworfen.

Eine zu sehr vollgestopfte Box klingt tot. Das wiederum heißt, daß eigentlich grundsätzlich, wenn man optimale Klangergebnisse erzielen will, nur 2. bis 5. in Frage kommen.

Hierbei ist 5. das Material mit der geringsten Güte und der geringsten frequenzselektiven Bedämpfung, fällt somit als optimales Material aus. 2., 3. und 4. sind Materialien, die die strengen Kriterien an Dämmstoffe erfüllen.

Wodurch unterscheiden sich diese und wobei sind sie am besten anzuwenden?

Hierzu muß etwas Physik erklärt werden.

Ein Membranlautsprecher strahlt grundsätzlich zu beiden Seiten die gleiche Schallenergie ab.

Die gleiche Energiemenge, die auf der einen Seite für einen Wohnraum ausreicht, wird auf der anderen Seite in das vergleichbar sehr kleine Lautsprechergehäuse abgege-

ben. Wird diese Schallenergie nicht im Gehäuse absorbiert, erfolgt eine Rückwirkung auf die Lautsprechermembran.

Dieser Effekt wird deutlich, wenn das LS-System einen kurzen Impuls durch das elektrische Signal am Lautsprechersystem erzeugt, danach trifft die nach innen abgestrahlte Schallwelle als Folge einer oder mehrerer Reflektionen im Gehäuse erneut auf die Membran und versetzt diese in Bewegung. Die Membran strahlt einen Impuls ab, obwohl kein elektrisches Signal am System anliegt, und das ganze beginnt von vorn. Je nach Gehäuseform wird so aus einem Signal eine ganze Reihe von unterschiedlich abgeschwächten Signalen, die mit einer Zeitverzögerung von 0,5 bis zu einigen Millisekunden vom Lautsprechersystem abgestrahlt werden.

Je besser jetzt das Impulsverhalten eines LS-Systems ist, umso klarer sind diese Impulse voneinander abgegrenzt und beeinträchtigen umso stärker die Ortungsfähigkeit des menschlichen Gehörs.

Bei zwei Lautsprechern und einem komplexen Musikprogramm läßt die Stereoortbarkeit sehr zu wünschen übrig.

Es ist daher unbedingt erforderlich, die Schallenergie im Gehäuse zu absorbieren, das gilt grundsätzlich auch für TL und Reflexboxen, bei denen die rückseitig abgestrahlte Energie nur im Bereich sehr tiefer Frequenzen genutzt wird.

Hier muß der Dämmstoff nur selektiv wirken um die tieferen Frequenzen nicht unnötig mit abzuschwächen.

2. Die Wahl des richtigen Platzes für das Dämm-Material

Der richtige Platz ist nie die Gehäusewand, sondern immer ein oder mehrere Orte zwischen Schallwand und Gehäuserückwand. Wieso das?

Der Dämmstoff soll Schallenergie vernichten und das geht sort am besten, wo die größte Schallschnelle ist und die ist = 0 an den Wänden, denn dort befindet sich immer der Umkehrpunkt der Schallschnelle.

Am Boden und am höchsten Punkt steht der Ball und am schnellsten ist er immer in der Mitte zwischen diesen beiden Punkten.

Daraus folgt, daß überall dort, wo stehende Wellen auftreten können und diese bedämpft werden sollen, dies nur bei den jeweiligen Schnellexima, also bei 1/4 der Gehäusetiefe optimal ist.

Besonders strenge Puristen stellen oder legen deshalb Dämmstoffe senkrecht von Gehäusedeckel zum Gehäuseboden auf (s. Bozak, eine der ausgereiftesten Boxenentwicklungen der Welt).

Um eine Vielzahl von Frequenzen zu dämpfen, wird auch oft das gesamte Gehäuse gleichmäßig mit Dämmstoff geblt. Dies ist wohl die einfachste Lösung.

Bauvorschlag für ein gewaltiges Baßhorn mit KEF-Bestückung, nach Dinsdale.

Hornlautsprecher

„The design of a horn loudspeaker is usually a long and tedious task“ (H. F. Oison)

Warnung von einem der es wissen sollte — und die durchaus berechtigt ist. Die Entwicklung eines guten Hornlautsprechers ist eine böse Rechenaufgabe.

Dafür ist der Hornlautsprecher noch, und sehr wahrscheinlich für immer, die beste Lösung, um hohen Schalldruck bei bester Klangqualität zu erzielen.

Neben wenigen anderen Konstruktionen, dem Carlson Coupler (mit dem richtigen Baßlautsprecher bitte) und der TunedPipe, sind Hörner gerade im Baßbereich ungeschlagen, ärgerlicherweise auch sehr groß.

Mit dem neuen „Constant Directivity“ Mittel- und Hochtonhörnern, ergeben sich hervorragende Möglichkeiten, einen Raum mit Schall „auszuleuchten“, bei sehr großen Räumen die einzige Möglichkeit halbwegs klare akustische Verhältnisse zu schaffen.

Die Impedanzkurve eines Hornes zeigt nur einen positiven Blindwiderstand, die Massenträgheit der Luft im Hörn. Hier gibt es keine Resonanzfrequenz und damit kein „Eigenleben“ der Luft, welches das Ausschwingen beeinflussen könnte. Da, wie an anderer Stelle genauer beschrieben, auch die Membranbewegung reduziert wird, können Hörner gerade im Baßbereich ungeheure Leistungen abgeben.

Ein Baßlautsprecher an einem Hörn, könnte bei einem Durchmesser von 38 cm und einer maximalen Amplitude von 2,5 cm ohne weiteres 4000 (viertausend) akustische Watt bei einer Frequenz von 50 Hz abgeben. Mechanisch dürfte er das allerdings nicht aushalten

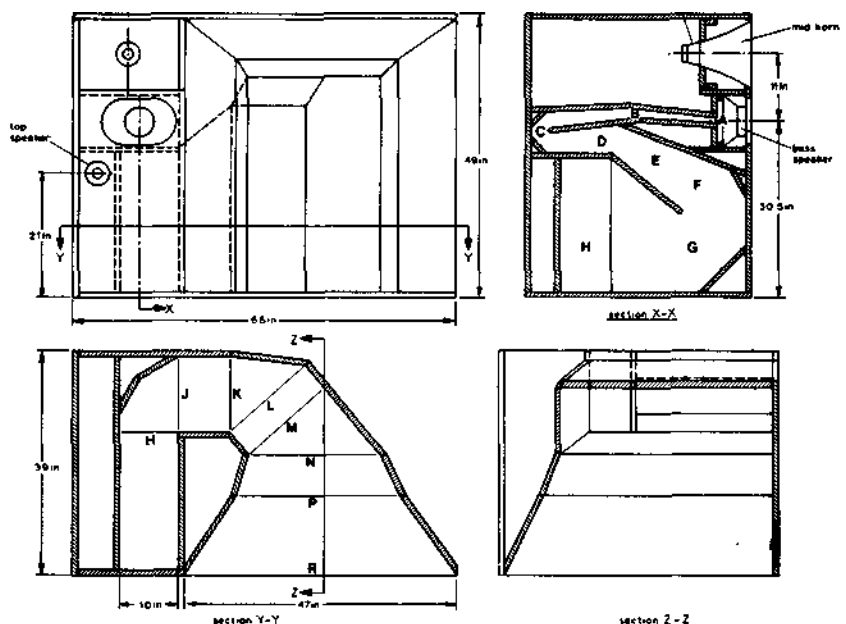
PAK Akustische Leistung (w)
 d max Amplitude der Membran m
 S_D Membranfläche m^2
 S_H Hornhalsfläche m^2

Betrachtet man diese Gleichung etwas genauer, kommt man aber auch sehr schnell auf den Grund, aus dem unnötig viel Mittel- und Hochtonhornstreiber „sterben“. Im Vertrauen auf die große Belastbarkeit, die von Baßhörnern bekannt ist, werden Frequenzweichen von zu geringer Flankensteilheit eingesetzt und/oder die Übernahmefrequenz viel zu tief gewählt.

Die Gleichung zeigt für einen Mitteltonhornstreiber mit einer maximalen Amplitude von 1 mm und einer Membranfläche von ca. 5 cm^2 eine maximale Schalleistung von ca. 16 akustischen Watt bei 500 Hz, 4 akustischen Watt bei 250 Hz und 1 akustischen Watt bei 125 Hz!

Das heißt, die Belastbarkeit sinkt hier bereits mit 6 dB pro Oktave.

Unterhalb der Grenzfrequenz des Hornes sinkt weiterhin der Strahlungswiderstand, den der Treiber am Hornhals „sieht“, spätestens jetzt wird der Treiber an einer 6 dB Weiche zerstört. Selbst eine 12 dB Weiche hilft hier nicht, das Hörn dürfte damit erst oberhalb seiner doppelten Grenzfrequenz betrieben werden, was ja nicht Sinn der Sache und darüberhinaus Platz- und Geldverschwendung ist. Frequenzweichen von 18 dB oder 24 dB sind angebracht.



Back Loaded Horns

LOWTHER Classic 200

Obwohl diese Lautsprecher seit über 50 Jahren gut bekannt sind, wird unter Hifi-Fans noch heute eifrig über die Vor- und Nachteile dieser Bauart diskutiert.

Ein kurzer Überblick: die Arbeiten von Olson und Massa in USA sowie Voigt in England waren wegweisend für die Entwicklung der ersten Back-Loaded Horns. (Olson H. & Massa F. Journal Acoustical Society America, Vol. 8, No 1, 1936; Voigt P. British Patents no 351.209, 1930; 404.037, 1934; 435.042, 1935). Während Olson und Massa zwei verschiedene Hörner vor und hinter einer Lautsprechermembran anbrachten (Compound-Horn-System), arbeitete Voigt nur mit einem Hörn. In beiden Fällen sollte das Hörn hinter der Lautsprechermembran deren hinteren Strahlungswiderstand bei tiefen Frequenzen erhöhen.

Unterschiede gab es bei der Form der Hörner. Olson arbeitete schon lange mit Exponentialhörnern, bei deren Berechnung von ebenen Wellenfronten im Hörn ausgegangen wird. Voigt entwickelte seine Tractrixhörner auf der Grundlage gleicher Schallgeschwindigkeit im Hörn. Auf dieser Grundlage ergaben sich halbkugelförmige Wellenfronten, daher der Name Kugelwellenhörner.

Der Höhepunkt in der Entwicklung der Back Loaded Horns waren einige Jahre später die „Imperial Hypex Horns“ der Jensen Man. Company in Amerika. Die Hypexhörner waren eine Entwicklung von Solomon und ermöglichten eine Verkleinerung der Abmessungen ohne die unteren Grenzfrequenzen zu verändern. Um Irrtümer zu vermeiden, wohnzimmertauglich wurden die Hörner dadurch nicht (160 x 90 x 70 cm).

Diese, für große Räume entwickelten, Hörner werden auch heute noch sehr erfolgreich in Discotheken eingesetzt.

Die englische Firma Lowther unter Paul Voigt blieb recht konsequent bei diesem Prinzip. Die Abmessungen der Hörner wurden weiter reduziert, natürlich auf Kosten des maximalen Schalldrucks, aber das „Wohnzimmerhorn“ fand schnell Freunde. Mit leistungsfähigeren Verstärkern kam allerdings auch die Konkurrenz zum Zuge. Große Baßreflexboxen mit Mittel- und Hochtonsystem waren preiswerter herzustellen und klangen zum Teil besser als die Lowther Hörner, deren Hersteller hartnäckig bei ihrer Philosophie „ein Lautsprecherchassis für alle Frequenzen“ blieben.

Die stetigen Verbesserungen auf dem Gebiet der Tonaufnahme, erheblich verbesserte Tonträger und Wiedergabeelektronik ließen die physikalischen Grenzen des Breitbandlautsprechers deutlich werden. Die Vorteile des Baßhorns konnten diese Män-

gel nicht kompensieren. Leider wurde sehr oft das Baßhorn für die klanglichen Mängel verantwortlich gemacht, sodaß heute eine gewisse Voreingenommenheit gegen den Einsatz kleiner Baßhörner besteht. Dieses Ergebnis ist von physikalischen Standpunkt schwer verständlich, denn diese Bauweise bietet einige Vorteile, die mit anderen Lautsprechergehäusen nicht ohne erheblichen Mehraufwand zu erzielen sind. Der Wert dieser Vorteile steigt dabei mit der Qualität der verfügbaren Tonträger. Die Erklärung dafür ist einfach. Baßreflexboxen und geschlossene Boxen sind sogenannte „Mass controlled Systems“, das klingt harmlos ist es aber nicht. Jedes Lautsprechergehäuse hat ein bestimmtes Volumen, dieses Volumen setzt der Lautsprechermembran, die bewegt werden soll, eine entsprechende Federsteife entgegen. Auch bei Baßreflexboxen (s. Kap. Baßreflex). Diese Federsteife und die bewegte Membranmasse bestimmen die Resonanzfrequenz des Systems. Der Antrieb (Magnet und Schwingspule) bestimmen den Schalldruck, den dieses schwingende System bei verschiedenen Frequenzen erzeugt.

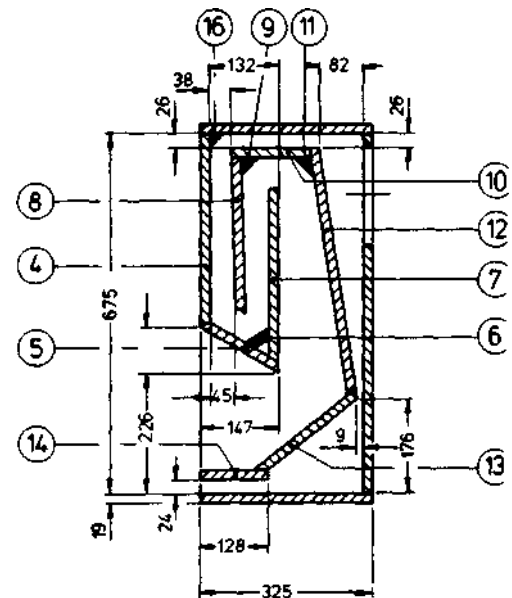
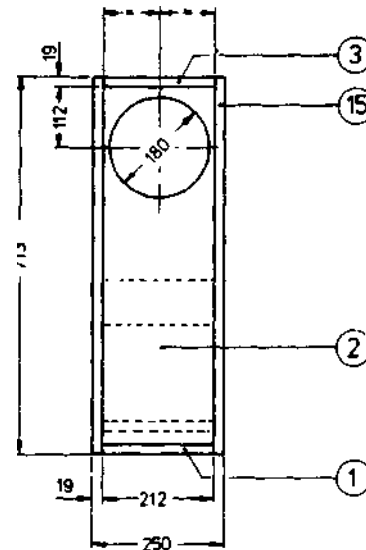
Je größer die Membranmasse ist, umso tiefer liegt die Resonanzfrequenz bei einer gegebenen Gehäusegröße und Membranfläche. Je kleiner der Magnet ist, umso größer ist der Schalldruck, den das System bei dieser Frequenz erzeugt.

Das Impulsverhalten eines solchen Systems ist allerdings nicht besonders gut. Ein besseres Impulsverhalten läßt sich nur durch eine Verringerung der bewegten Masse und einen stärkeren Antrieb realisieren und das geht ärgerlicherweise auf Kosten der Baßreproduktion (s. Kap. Geschlossene Boxen, Baßreflexboxen).

Der Hornlautsprecher arbeitet dagegen im Baßbereich unabhängig von der Membranmasse, allein die Form und Länge des Hornes bestimmen die untere Grenzfrequenz. Jeder der mit einem impulsoptimierten Lautsprecherchassis wie zum Beispiel den „Podszus Görlich“ Chassis einen echten Tiefbaß erzielen will, kommt um eine Hornkonstruktion nicht herum (s. Kap. Podszus Görlich).

Die Berechnung dieser Hörner ist allerdings nur dann vergleichsweise einfach, wenn die Hornmündfläche groß genug ist. Wird die Mundöffnung eines Hornes kleiner als nötig (vgl. Kap. Hörner) oder mit anderen Worten das Hörn kürzer als es sein müßte, so wird die Berechnung außerordentlich kompliziert.

Die untere Grenzfrequenz dieser Hörner liegt, abhängig von der Länge, mitunter erheblich über der Frequenz, die sich nach der Hornberechnung ergeben hätte. In diesen Fällen verhält sich das Hörn eher wie



Pos	Stck	Maße in mm
1	1	325 x 212 x 19
2	1	675 x 212 x 19
3	1	325 x 212 x 19
4	1	364 x 212 x 19
5	1	170 x 212 x 19
6	1	52 x 212 x 19
7	1	325 x 212 x 19
8	1	292 x 212 x 19
9	1	44 x 212 x 19
10	1	150. x 212 x 19
11	1	48 x 212 x 19
12	1	472 x 212 x 19
13	1	250 x 212 x 19
14	1	128 x 212 x 19
15	2	713 x 325 x 19
16	1	21 x 21 x 212

ein zylindrisches Hörn (Transmission Line), bei dem die Länge maßgeblich über die untere Grenzfrequenz entscheidet. Das Ergebnis hat schon einige Verwirrung gestiftet. Ein Hörn mit einer berechneten Grenzfrequenz von 10 Hz und einer Länge von ca. 3 m hat eine effektive Grenzfrequenz von 30 Hz. Die Grenzfrequenz liegt dabei immer höher als die einer Transmission Line gleicher Länge. Das ist der Preis für den gewonnenen Strahlungswiderstand durch die größere Öffnungsfläche.

Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist sehr wichtig, da sich die Baßabstrahlung durch ein „Reactance Annulling“ nur dann optimieren läßt, wenn die Grenzfrequenz bekannt ist. Das Reactance Annulling ermöglicht eine weitere Reduktion der Hornabmessungen ohne Beeinträchtigung der unteren Grenzfrequenz. Dieses Verfahren wurde erstmals von Paul Klipsch angewendet und später von Plach und Williams unter diesem Namen bekannt gemacht.

{Klipsch, Paul W.: A low frequency Hörn of small Dimensions Journal Acoustical Soc. America Vol. 13, No 2, October 1941
 Plach, D- J.: Design factors in Hörn type Speakers Journal Audio Engineering Vol 1, p. 276-281, october 1953
 Plach, D. J. & Williams, P. B.: Reactance Annulling for Hörn type Loudspeakers Radio Electronic Engineering p. 15 - 18, February 1955)

Die Unterschiede zwischen konischen, exponential, Hypex- und parabolischen Hörnern liegen im frequenzabhängigen Verlauf der Strahlungs- und Blindwiderstandanteile. Gelingt es die Blindwiderstandsanteile zu eliminieren wird die Schallabstrahlung im Bereich der unteren Grenzfrequenz erheblich effektiver. Ein Ergebnis, das sonst nur mit einem erheblich größeren Hörn zu erzielen wäre.

Da der Blindwiderstand des Hornes eine Folge der Massenträgheit der Luft im Hörn ist, genügt eine Federsteife gleicher Größe um den Einfluß zu kompensieren. Bei der „Back Loaded Horns“ ist es allerdings nicht möglich, die Federsteife unabhängig von der Membranaufhängung des Lautsprecherchassis durch eine Luftkammer hinter den Chassis zu realisieren (Klipsch), da hier bereits das Hörn selbst angebracht ist.

Die Konstruktion des Back Loaded Horns ist insofern erheblich schwieriger. Da die Federsteife des Lautsprechers nicht verändert werden darf, muß das Hörn „maßgeschneidert“ werden, wobei meist die Länge (maßgeblich für die untere Grenzfrequenz) und danach das Verhältnis von Hornhalsfläche zur Membranfläche festgelegt wird.

Je kleiner die Hornhalsfläche gewählt wird, umso größer ist der Wirkungsgrad der LS-Horn Kombination.

Bei richtiger Wahl der Fläche ist der Schalldruck des Hornes bei niedrigen Frequenzen gleich dem des Lautsprechers bei höheren Frequenzen.

Somit bleibt allerdings nur noch eine Möglichkeit; den Blindwiderstand mit der Federsteife des gewählten Lautsprechersystems gleichzusetzen. Je nach gewähltem Lautsprecher kann dabei ein reines Expohorn oder ein Hypexhorn die optimale Hornform sein.

Hypexhörner bieten hier einen weiten Spielraum, da über dem Hypex Parameter T der Blindwiderstand ohne Änderung der Grenzfrequenz variiert werden kann.

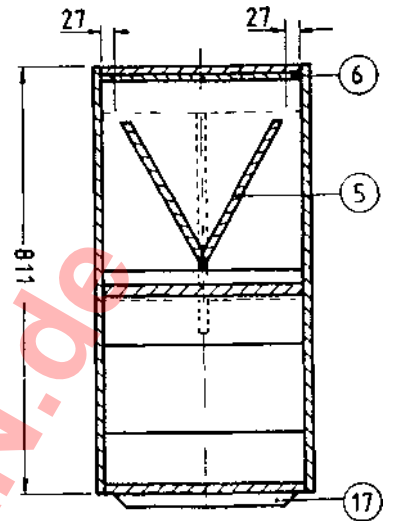
Für T = 1 ergibt sich ein Expo Hörn

Für T = 0 ergibt sich ein sogenanntes Catenoid Hörn (catenoid = Kettenlinie).

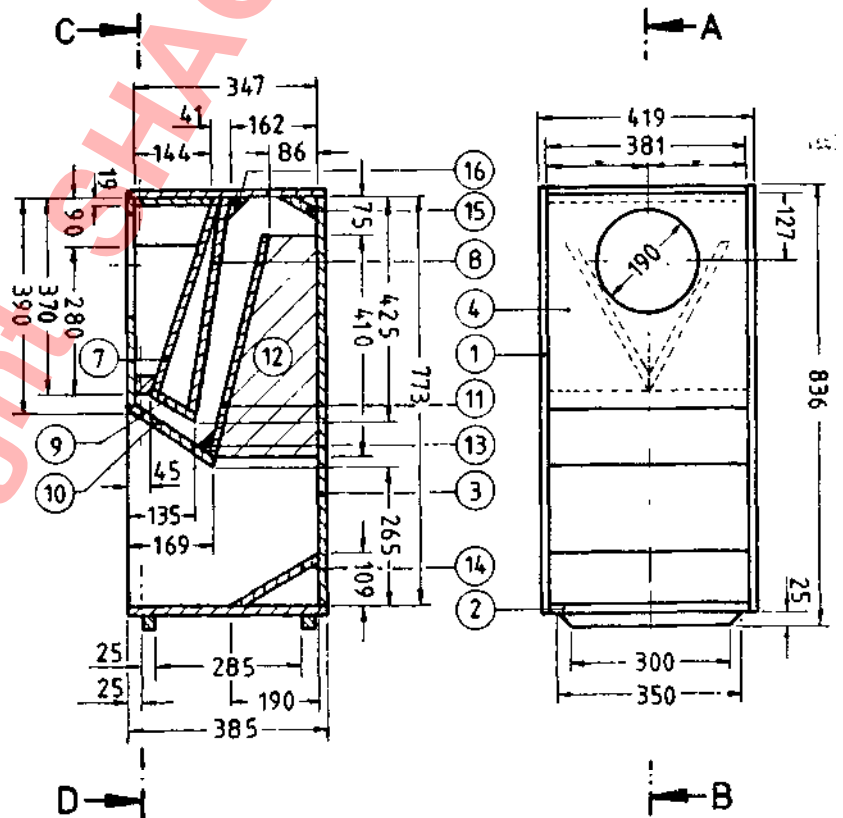
Die entsprechenden Kurven sind in der Grafik eingezeichnet.

Bei richtiger Berechnung können auch kleinere Hornsysteme sehr gute Ergebnisse bringen, nur ist, wie gesagt, die Berechnung sehr kompliziert und nur für einen bestimmten Lautsprecher richtig.

Es ist daher unbedingt auf vorhandene Konstruktionen zurückzugreifen, Eigenentwicklungen lohnen sich nur für Hifi-Fans, die über den nötigen Platz für „ausgewachsene“ Hörner verfügen.



Schnitt C-D



Schnitt A-B

Beispiel für ein kleines Back-Loaded Hörn. In Verbindung mit einem geeigneten Subwoofer ist die Leistungsfähigkeit auch kleiner Systeme beeindruckend und von größeren Baßhörnern kaum zu unterscheiden, (vgl. dazu die näheren Beschreibungen im R. A. E. Hornprospekt.)

Baßhörner

Parabolisch	Konisch	Hyperbolisch		Zylindrisch
—	—	Exponential	Catenoidal	—
$S_x = S_T \left[\frac{x}{x_0} \right]$	$S_x = S_T [\cosh mx + T \sinh mx]^2$	$S_x = S_T e^{2mx}$	$S_x = S_T \cos^2 mx$	$S_x = S_T$
—	$T = \infty$	$T = 1$	$T = 0$	—
—	—	$f_c = \frac{mc}{2\pi}$	$f_c = \frac{mc}{2\pi}$	—

Ist ein solches Expo- oder Hypexhorn von endlicher Länge, so gilt für f_1 (die Frequenz, bei der das unterste Strahlungswiderstandsmaximum liegt).

$$f_1 = \frac{c}{4L_e} \sqrt{1 + \left(\frac{2mL_e}{\pi}\right)^2}$$

Für das zylindrische Hörn (Transmission-Line) gilt dagegen:

$$f_1 = \frac{c}{4L_e}$$

Die Länge L_e beinhaltet dabei eine Endkorrektur, d. h. L_e ist größer als die tatsächliche Länge des Horns. Dabei ist für die Größe der Endkorrektur der Radius der Hornöffnung ausschlaggebend.

Die effektive Länge des Horns wird daher durch die Größe der Hornöffnung beeinflusst.

Hörn B mit einer effektiven Länge von 3 m und einer Horn Grenzfrequenz von 10 Hz hat in diesem Fall die gleiche effektive Grenzfrequenz (30 Hz) wie Hörn A mit einer effektiven Länge von 6 m und einer Horn Grenzfrequenz von 27 Hz, nur hat sich die Fläche von Hörn B gerade verdoppelt, während die Mundöffnung von Hörn A gut 160-fach größer ist als die Halsfläche.

Hörn A ist bei einer Halsfläche von ca. 150 cm² und einem Munddurchmesser von ca. 1,8 m (2,54 m²) ein ausgewachsenes 30 Hz Hörn für Wandaufstellung. Soll ein solches Hörn in einer Raumecke betrieben werden, so kann es ca. 75 cm kürzer gebaut werden, da die erforderliche Mundfläche nur noch 1,3 m² sein muß.

Hörner derartiger Abmessungen sind nicht überall realisierbar, sollten aber auch nur dann in Betracht gezogen werden, wenn die untere Grenzfrequenz des Raumes unter dieser Frequenz liegt.

Ein 50 Hz Eckhorn (cut off Frequenz ca. 42 Hz) ist mit einer nötigen Mundfläche von 0,45 m² bei einer effektiven Länge von mind. 3 m schon praktikabler.

Dabei ist zu beachten, daß die Mundfläche weder zu klein noch zu groß werden darf!

Nach den Untersuchungen von Keele (Keele, D. B. Optimum Horn Mouth Size; Convention of the Audio Engineering Society 46, 1973 New York) gibt es eine optimale Mundfläche abhängig von der cut off Frequenz und der Aufstellung des Hornes.

Wird die Fläche zu groß gewählt, treten erhebliche Reflektionen auf. Der Umfang einer Mundöffnung sollte bei freier Aufstellung sowie für Mitteltonhörner nie viel grö-

ßer sein als die Wellenlänge der cut off Frequenz. Bei Baßhörnern darf die entsprechende Fläche, wie bekannt, reduziert werden. (Eckaufstellung)

Zurück zu den oben angesprochenen Hörnern:

Durch ein Reactance Annulling läßt sich die Schallabstrahlung im Bereich der cut off Frequenz dieser Hörner erheblich verbessern:

$$\omega_c(M_D + M_H) - \frac{S_D}{\omega_c} = 0$$

Die Federsteife des Lautsprechers bestimmt zusammen mit dessen bewegter Masse die Resonanzfrequenz.

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_D \times S_D}}$$

Für ein bestimmtes Hörn mit idealer Mundfläche (s. o.) ergibt sich

$$f_s = \left[f_c^2 + \frac{42,7 \times A_0^2 \times f_c}{T \times A_T \times M_D} \right]^{1/2}$$

- AD = S_q inch
- AT = S_q inch
- MD = Gramm
- T = Hypexparameter

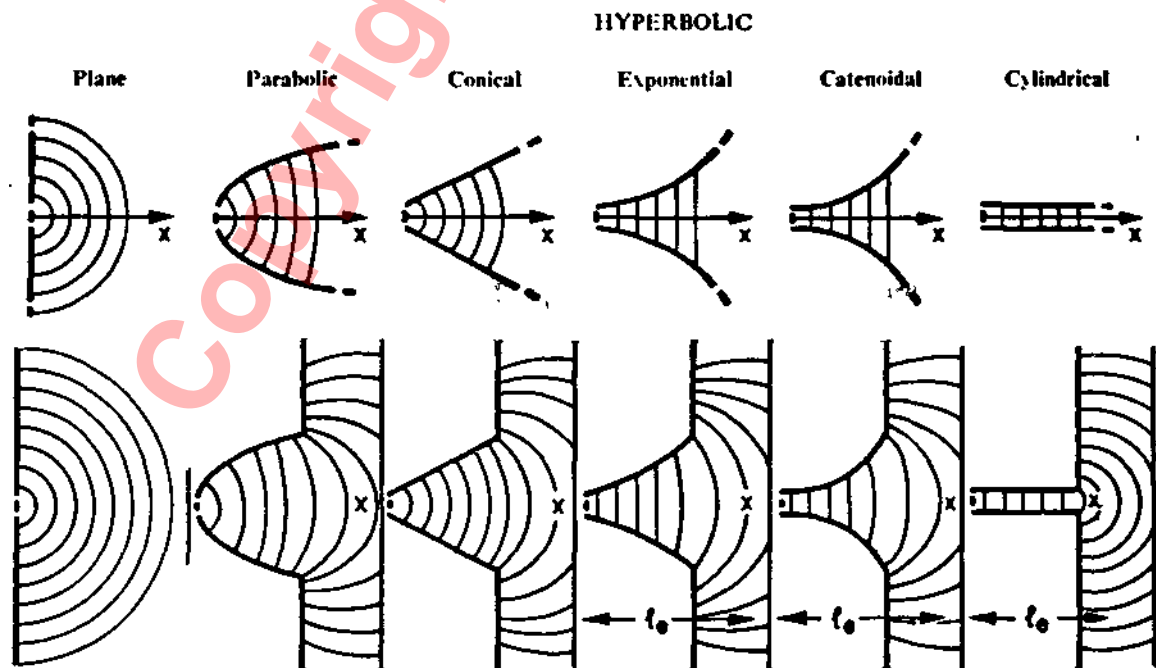
Ein Lautsprecher mit einer bestimmten bewegten Masse besitzt die richtige Federsteife, wenn seine Resonanzfrequenz gleich der berechneten Frequenz f_s ist.

Die Formel stammt aus dem Artikel von Plach und William, daher die Angaben in Square inch.

Diese „amerikanische Dimensionierung“ soll aber im Augenblick keine Rolle spielen.

Die Formel zeigt eine noch immer nicht allen bekannte Tatsache:

Die Resonanzfrequenz des Lautsprechers sollte über der cut off Frequenz des Horns



liegen, nur so wird ein Reactance Annulling überhaupt möglich.

Weiterhin zeigt die Formel bereits den Einfluß von T, der bei Hypexhörnern unabhängig von der unteren Grenzfrequenz variiert werden kann, und die Abhängigkeit zwischen Membranfläche und Hornhalsfläche.

Wie sinnvoll ein Reactance Annulling ist, zeigt die folgende Formel: (ebenfalls aus dem Artikel von Plach und Williams)

Die akustische Leistung Pak eines Hornlautsprechers ist bei einer gegebenen Generatorspannung E_g und einer Frequenz f

- B_l = Kraftfaktor
- R_c = Schwingspulenwiderstand
- R_H = Strahlungswiderstand des Hornes
- $\omega = 2\pi f$

$$P_{ak} = \frac{B_l^2 E_g^2 R_H \times 10^{-9}}{(R_c R_H + B_l^2 \times 10^{-9})^2 + R_c^2 [\omega (M_D + M_H) - S_D/\omega]^2}$$

Der zweite Term im Nenner hat bei $\omega = \omega_c$ seinen Wert, da die Reaktanz des Hornes ($X_M = M_H \times \omega$) bei dieser Frequenz sehr groß wird.

Bei optimalem Reactance Annulling ist bei ω_c der gesamte zweite Term gleich 0, P_{ak} wird entsprechend größer.

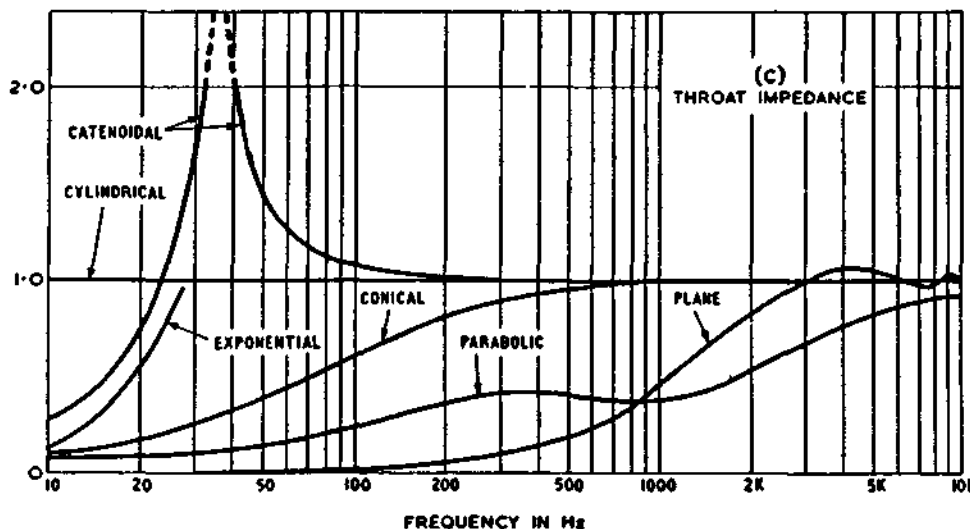
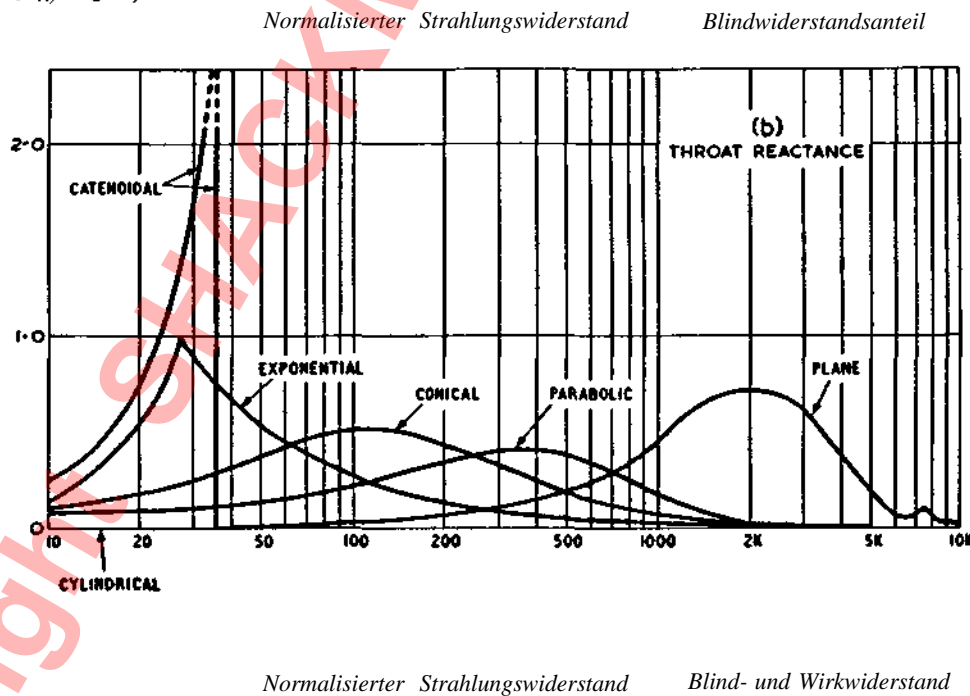
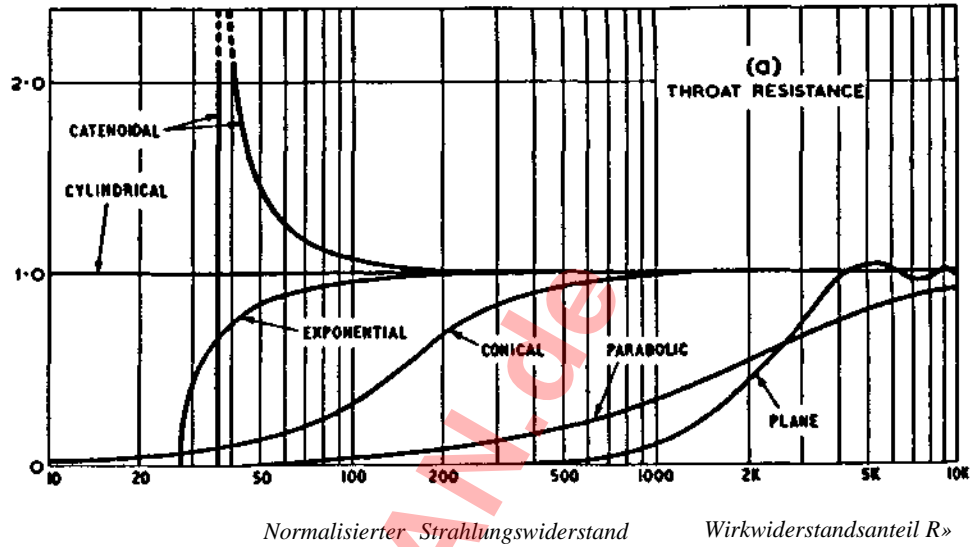
Bei der konkreten Berechnung zeigen sich die Grenzen des Möglichen. Für ein kleines Baßechorn $T = 1$, U ca. 3,5 m, Hörn Cut Off Frequenz 42 Hz, AM 0,45 m², $A_H = 100$ cm², $A_D = 200$ cm²; müßten ein Treiber mit einer bewegten Masse von 10 g = 125 Hz und 50 g = 71 Hz Resonanzfrequenz haben. Die entsprechende Nachgiebigkeit der Aufhängung CMS wäre dabei $0,16 \times 10^{-3}$ bei 10 g und $0,1 \times 10^{-3}$ bei 50 g.

Hier zeigt sich, daß die höhere Membranmasse als zusätzliche Masse eine entsprechend höhere Federsteife erfordert.

Ebenso zeigt sich an der Resonanzfrequenz, daß die Federsteife der benötigten Lautsprecher bereits für $T = 1$ und große Hornhalsflächen recht hoch sein müssen. Im Bereich von $T = 1$ bis $T = 0,3$ ist eine Anpassung an einen bestimmten Lautsprecher ohne Einfluß auf die Grenzfrequenz möglich. Dieses Verfahren ohne komplizierte Berechnung ist nur mit sehr großen Hörnern tiefer Grenzfrequenz oder speziellen Lautsprechern möglich. Eine bessere Anpassungsmöglichkeit bietet sich mit den „front loaded Hörn“. Hier kann eine zusätzliche Luftkammer hinter der Lautsprechermembran angebracht werden.

Durch dieses zusätzliche Luftvolumen läßt sich die gewünschte höhere Resonanzfrequenz für jeden Lautsprecher individuell realisieren.

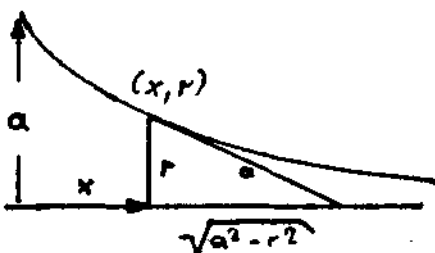
Die Berechnung erfolgt wie bei einer geschlossenen Box und ist daher sehr einfach (s. Kap. geschlossene Box).



Kugelwellenhörner

Das Tractrixhorn, bei dessen Flächenberechnung von kugelförmigen Schallwellen im Hörn ausgegangen wird, ist bei gleicher Öffnungsfläche kürzer als ein Exponentialhorn. Da die Berechnung dieser Hörner nicht ganz unkompliziert ist, können die entsprechenden Werte auch aus der Grafik abgelesen werden.

Nachdem eine geeignete Grenzfrequenz festgelegt worden ist, sind, ausgehend von der Hornmundfläche, alle Flächen auf der vertikalen Skala und die dazugehörigen Längen auf der horizontalen Skala angegeben. Die notwendige Gesamtlänge ist abhängig vom verwendeten Treiber, die horizontale Skala wird bei Treibern von mehr als 8" Durchmesser entsprechend parallel verschoben. Die Hornhalsgröße der verschiedenen Hörner folgt den Empfehlungen von Dinsdale, die Hornhalsfläche hat ca. 30% der Membranfläche, diese Werte können natürlich geändert werden um das Hörn speziell an bestimmte Treiberparameter anzupassen.



Die Tractrixgleichung ist im Prinzip recht leicht herzuleiten. In der Literatur finden sich die verschiedensten Gleichungen, die ineinander umwandelbar sind. An jedem Punkt der gekrümmten Homkontur eines runden Tractrix-Hornes läßt sich eine Tangente anlegen, die in Mittellinie schneidet. Der Berührungspunkt definiert mit der Mittellinie den Radius einer Kugelweite im Hörn. Für die Steigerung am Berührungspunkt (Hornöffnungswinkel) gilt:

$$\frac{dr}{dx} = -\frac{r}{\sqrt{a^2-r^2}}$$

integriert ergibt sich: $\int \frac{\sqrt{a^2-r^2}}{r} dr = - \int dx$

or $x = a \cdot \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2-r^2}}{r} \right) - \sqrt{a^2-r^2}$

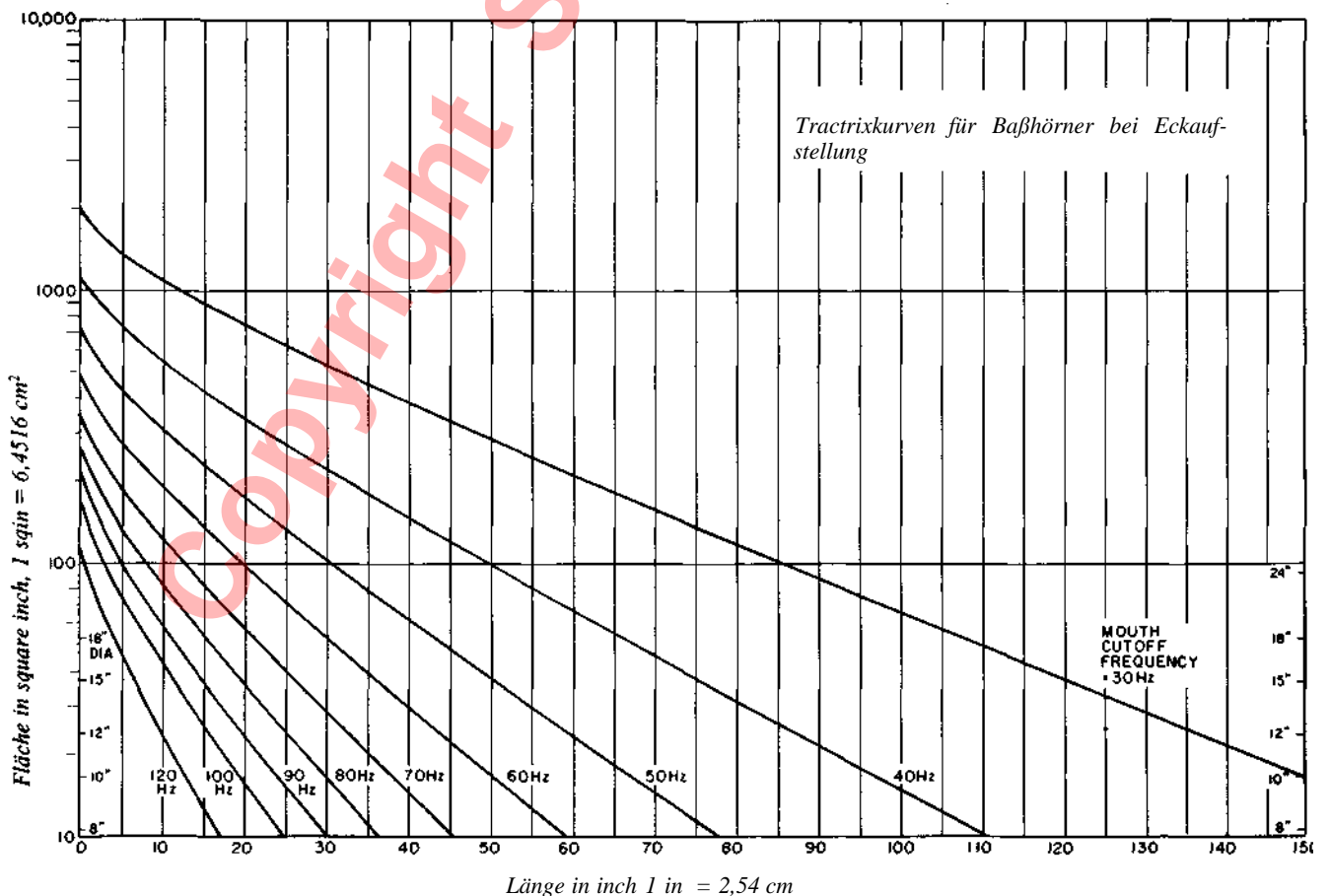
Diese Gleichung ist äquivalent mit Dinsdales Gleichung wenn $a = \text{Lambda}/\wedge$ eingesetzt wird. Über die Beziehung:

$$\frac{a + \sqrt{a^2-r^2}}{a - \sqrt{a^2-r^2}} = \frac{a + \sqrt{a^2-r^2}}{a - \sqrt{a^2-r^2}} \cdot \frac{a + \sqrt{a^2-r^2}}{a + \sqrt{a^2-r^2}} = \frac{(a + \sqrt{a^2-r^2})^2}{r}$$

ergibt sich die Gleichung von Baidock und Wilson.

$$x = \frac{a}{2} \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2-r^2}}{a - \sqrt{a^2-r^2}} \right) - \sqrt{a^2-r^2}$$

Die Tractrixkurve ist ursprünglich von Leibnitz im Jahr 1690 entwickelt worden, hat aber ihren Namen von Huygens^der sie erstmals analytisch löste.



Flächenentwicklung von Tractrixhörnern bei Eckaufstellung. Grenzfrequenzen 30 bis 120 Hz verwendbare Treiber: 8" bis 24" (20 bis 60 cm) Durchmesser.

Freq. (Hz)	Wave-length (ft)	Diameter (ft)	Area (sq ft)
30	375	1194	111 98
40	2813	895	62 92
50	225	716	40 27
60	1875	597	280
70	1607	512	20 59
80	1406	448	15 77
90	125	398	1244
100	1125	358	10 07
110	1023	325	8 30
120	938	298	6 98

Mindestabmessungen der Hornmundöffnung bei freier Aufstellung

Freq (Hz)	Cut-off freq (Hz)	Flare coeff. (ft ⁻¹)	Area increase (%ft ⁻¹)	Doubling dist (ft)
30	25	278	32	249
40	33	366	44	189
50	42	466	59	149
60	50	555	74	125
70	58	644	90	108
80	66	733	108	945
90	75	833	130	832
100	84	932	154	744
110	92	1 02	178	679
120	100	1 11	205	624

Nom dia. (in)	Area (sq in)	Effective area (sq in)	Throat area (sq in)	Throat area (sq-ft)
3i	9 62	6 74	2 02	014
5	1964	13 75	4 12	029
6i	3319	23 23	6 97	048
8	50 27	35 19	10 56	073
10	78 55	54 99	16 50	114

Empfohlene Hornhalsöffnungen für Hornlautsprechersysteme

selbstverständlich können auch andere Werte gewählt werden, wenn höherer Wirkungsgrad oder geringere Verzerrungswerte erreicht werden sollen

Freq. (Hz)	Area (sq. ft)	Dia (ft)	Sq side (ft)	Rect sides (ft)
30	28	597	529	4 69 5 97
40	15 73	447	396	3 52 4 47
50	10 07	358	317	2 81 3 58
60	7 0	298	264	2 34 2 98
70	5 15	256	227	2 01 2 56
80	3 94	224	198	1 76 2 24
90	3 11	199	176	1 56 1 99
100	2 52	179	158	1 41 1 79
110	2 07	162	144	1 27 1 62
120	1 74	149	132	1 17 1 49

Mindestabmessung der Hornmundöffnung bei Wandaufstellung

Freq (Hz)	Cut-off freq. (Hz)	Flare coeff (in ⁻¹)	Area increase (%m ⁻¹)	Doubling dist (in)
200	166	155	17	448
250	208	193	21	359
300	250	233	26	297
350	292	271	31	256
400	330	307	36	226
450	375	349	42	198
500	420	391	48	177
550	458	426	53	163
600	500	465	59	149
700	580	539	71	129
800	660	614	85	113
900	750	698	101	993
1000	840	781	118	887
1100	920	855	135	810
1200	1000	930	153	745
1300	1083	1 01	175	686
1400	1166	1 08	196	642
1500	1250	1 163	218	596
2000	1660	1 54	368	450
2500	2080	1 93	590	359

Doubling dist = Entfernung zwischen jeder Flachenverdopplung

Nom dia (in) = Größe der Lautsprecherchassis

3 5 in = 9 cm, 5 in = 13 cm, 5 5 in = 17 cm, 8 in = 20 cm, 10 in = 25 cm

Effective area = effektive Membranfläche

Throat area = Hornhalsfläche

sqin (Square inch) = 6,4516 cm²

sqft (square feet) = 930 cm²

Freq. (Hz) = Frequenz der Hornberechnung

Cut-off Freq (Hz) = -3 dB Frequenz

Wavelength = Wellenlänge der Frequenz

Diameter = Durchmesser

Area = Fläche

sq Side = Seitenlänge bei quadratischer Öffnung

Rect Sides = Seitenlängen bei rechteckiger Öffnung

Freq. (Hz)	Area (sq ft)	Dia. (ft)	Sq. side (ft)	Rect sides (ft)
30	140	422	375	3 32 4 22
40	787	316	281	2 49 3 16
50	503	253	224	1 99 2 53
60	35	211	187	1 66 2 11
70	257	180	160	1 42 1 80
80	197	158	140	1 24 1 58
90	155	141	125	1 10 1 41
100	126	127	112	0 995 1 27
110	104	115	102	0 904 1 15
120	087	105	093	0 829 1 05

Mindestabmessung der Hornmundöffnung bei Eckaufstellung

Exponentialkonstanten

Flare coeff = Öffnungskonstante

Area increase = Flächenzunahme in Prozent

Freq (Hz)	3i		!i		6i		(i		10	
	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr
30	273	251	247	225	229	207	214	192	198	176
40	192	176	172	156	158	142	147	131	135	119
50	141	128	126	113	115	102	106	93	962	830
60	112	101	988	878	898	788	822	712	742	632
70	917	823	805	711	725	631	660	566	592	498
80	769	683	670	584	601	515	544	458	483	397
90	648	575	561	488	500	427	450	377	397	324
100	557	491	479	413	425	359	380	314	332	266
110	490	430	418	358	369	309	328	268	284	224
120	434	379	368	313	323	268	285	230	246	191

Länge eines Baßhorns (feet) bei verschiedenen Öffnungskonstanten, Wandaufstellung Ex = Exponentialhorn Tr = Tractxhorn (Kugelwellenhorn) Die Werte für die Tractxhorne sind angenähert

	Wave-length (in)	Dia. (in)	Area	Sq. side (in)	Rect. sides (in)
200	67 5	32 2	8154	28 6	25 3 32 2
250	54 0	25 8	522 9	22 3	20 3 25 8
300	45 0	21 5	365 1	19 1	16 9 21 5
350	38 57	18 4	265 9	16 3	14 5 18 4
400	33 75	16 1	203 6	14 3	12 6 16 1
450	30	14 3	160 6	12 7	11 3 14 3
500	27 0	12 9	130 7	11 4	10 1 12 9
550	24 55	11 7	107 5	10 4	9 2 11 7
600	22 5	10 7	89 9	9 5	8 4 10 7
700	19 28	9 2	66 5	8 2	7 2 9 2
800	16 88	8 1	51 5	7 2	6 3 8 1
900	15	7 2	40 7	6 4	5 6 7 2
1000	13 5	6 4	32 2	5 7	5 1 6 4
1100	12 27	5 9	27 3	5 2	4 6 5 9
1200	11 25	5 4	22 9	4 8	4 2 5 4
1300	10 38	4 9	18 8	4 3	3 9 4 9
1400	9 64	4 6	16 6	4 1	3 6 4 6
1500	9	4 3	14 5	3 8	3 4 4 3
2000	6 75	3 2	8 0	2 8	2 5 3 2
2500	5 40	2 6	5 3	2 3	2 0 2 6

Freq. (Hz)	3i		i		6i		8		10	
	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr	Ex	Tr
30	24 8	22 6	22 2	20 0	20 4	18 2	18 9	16 7	17 3	15 1
40	17 3	15 7	15 3	13 7	13 9	12 3	12 8	11 2	11 6	10 0
50	12 6	11 3	11 1	9 8	9 9 8	8 6 6	9 0 8	7 7 6	8 1 2	6 8 0
60	9 9 5	8 8 5	8 6 4	7 5 4	7 7 3	6 6 3	6 9 7	5 8 7	6 1 7	5 0 7
70	8 1 0	7 1 6	6 9 6	6 0 2	6 1 8	5 2 4	5 5 3	4 5 9	4 8 3	3 8 9
80	6 7 5	5 8 9	5 7 5	4 8 9	5 0 7	4 2 1	4 5 0	3 6 4	3 8 9	3 0 3
90	5 6 5	4 9 2	4 7 8	4 0 5	4 1 7	3 4 4	3 6 7	2 9 4		
100	4 8 3	4 1 7	4 0 5	3 3 9	3 5 1	2 8 5				
110	4 2 2	3 6 2	3 5 1	2 9 1						
120	3 7 2	3 1 7								

Exponentialkonstanten für Mittel- und Hochtonhorne

Länge eines Baßhorns für verschiedene Öffnungskonstanten, Eckaufstellung Ex = Exponentialhorn, Tr = Tractxhorn Die Werte für die Tractxhorne sind angenähert

Elektrostatische Lautsprecher — gibt es die originalgetreue Wiedergabe

Die originalgetreue Wiedergabe komplexer Musik ist bekanntlich keine leichte Aufgabe für einen Lautsprecher.

Sie erfordert nicht nur die exakte Reproduktion aller Schallwellen von 17 m bis 1,7 cm Länge und Schalldruckpegel von 120 dB (1 : 1000000), erst die zeitliche Abfolge bestimmter Frequenzen und Amplituden erzeugt die Klangstruktur der Musikinstrumente.

So unterscheiden sich einige Musikinstrumente kaum in den Frequenzen, die sie erzeugen, allein die Reihenfolge der Grund- und Obertöne bewirken einen völlig unterschiedlichen Klang.

Ein weiteres Problem bei der Wiedergabe komplexer Musik sind die sogenannten mikrozeitlichen Pegelschwankungen verschiedener Instrumente.

Diese Lautstärkenschwankungen angehaltener Töne informieren über das „Gattungstimbre“, ob ein Klang von einem Blas- oder Streichinstrument erzeugt wird. Mit der Zahl der Instrumente eines Orchesters summieren sich dabei die Anforderungen an den Lautsprecher ganz erheblich. Kleinste zeitliche oder dynamische Fehler werden bei der Wiedergabe sofort als undifferenzierter Klang hörbar.

Um keine Illusionen aufkommen zu lassen, die perfekte Musikreproduktion über Lautsprecher ist unmöglich, auch wenn einige Werbesprospekte anderer Meinung sein sollten.

Sobald die Wiedergabequalität die Aufnahmequalität erreicht, kann man von optimaler Wiedergabe sprechen, eine weitere Steigerung ist logischerweise nicht möglich.

Jeder, der den Klang eines guten Kopfhörers kennt, weiß wie gering dieser Unterschied mittlerweile sein kann.

Warum ist eine Wiedergabe mit Kopfhörerqualität eigentlich so schwer zu realisieren?

Ein kurzer Seitenblick zur Aufnahmetechnik bietet eine deutliche Erklärung. Ein winziges Stück einer wenige tausendstel Millimeter dicken Kunststoff-Folie ist das Kernstück der besten Studiomikrophone.

Praktische masselos folgt diese Folie als Membran eines Kondensatormikrophons den Schallschwingungen der Luft. Ein aufgedampfter Metallbelag auf der Folie und eine feststehende Gegenelektrode ergeben einen Kondensator, der zur Erzeugung eines elektrischen Signals genutzt werden kann.

Durch den konsequenten Verzicht auf bewegte Masse, Schwingspulen und Magnetfelder sowie den Einsatz modernster Technologien ist inzwischen eine fast perfekte Umwandlung von akustischer in elektrische Energie möglich geworden.

Bei der Entwicklung einer neuen Studio-Mikrophonserie des dänischen Meßgeräte-Spezialisten „Bruel & Kjaer“, die auch die anspruchsvollsten Aufnahmesituationen meistern sollte, zeigte sich wieder sehr deutlich wie wichtig diese Kombination aus dynamisch und zeitlich richtigem Impulsverhalten ist.

Nur ein praktisch masseloses System ist in der Lage, beide Parameter simultan zu erfüllen, ohne Kompromisse einzugehen.

Bei einem masselosen System liegt die theoretische mechanische Resonanzfrequenz unendlich hoch, bei den realisierten Mikrofonen ist die unterste Resonanzfrequenz mit ca. 50 kHz noch immer weit oberhalb des Hörbereiches.

Geringste Masse bedeutet bestes Impulsverhalten, hohe mechanische Resonanzfrequenz bedeutet lineares Phasenverhalten, da Phasendrehungen immer erst im Bereich dieser Resonanzfrequenz und darüber auftreten.

So ist z. B. der Phasenfrequenzgang des Mikrophons 4007 von 50 - 20 kHz innerhalb von $\pm 5^\circ$ linear.

Bei den elektrostatischen Kopfhörern wird dieses Prinzip umgekehrt verwendet, hier wird ebenfalls eine Folie zwischen zwei Metallgittern aufgehängt. Wird diese Folie elektrostatisch aufgeladen, kann sie durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Metallgitter bewegt werden.

Da auch diese Folie praktisch masselos ist und über die gesamte Fläche gleichmäßig angetrieben wird, reproduziert sie exakt das vom Mikrophon aufgenommene Signal. Der geringe Unterschied zwischen Aufnahme und Kopfhörerwiedergabe resultiert aus der Ähnlichkeit und Kompromißlosigkeit der beiden Wandler.

Eine Vergrößerung der strahlenden Fläche führt zu den elektrostatischen Lautsprechern.

Dieser Wandler besitzt alle Vorteile des elektrostatischen Kopfhörers und reproduziert auch kleinste Details so, wie sie vom Mikrophon aufgenommen wurden. Da auch hier die Folienmembran über die gesamte Fläche gleichmäßig angetrieben wird, beeinträchtigt die etwas größere Masse anders als beim dynamischen Membranlautsprecher nicht das Impulsverhalten des Wandlers.

Der elektrostatische Lautsprecher besteht praktisch aus einer unendlichen Zahl masseloser angetriebener Einzelmembranen, während beim dynamischen Tauchspulenlautsprecher der größte Teil der bewegten Masse nur die Verbindung zwischen Antrieb und Umgebungsluft herstellt.

Der geringe Abstand der beiden Metallgitter ermöglicht leider keine großen Auslenkungen der Folie. Soll ein solcher Elektrostat zur Reproduktion eines gesamten hörbaren Frequenzbereiches eingesetzt werden, so ergeben sich recht unhandliche Abmessungen. Dieser Umstand hat die Verbreitung der filekrostaten in der Vergangenheit gründlich behindert.

Einige bekannte Exemplare besitzen Membranflächen von über 2 m² und müssen dennoch im Baßbereich als Kompromiß betrachtet werden.

Als Ausweg bietet sich nur die Möglichkeit, einen kleineren Elektrostaten mit einem Schwingspulenlautsprecher zu kombinieren. Die Realisierung einer solchen Kombination ist jedoch alles andere als einfach.

Alle Schwingspulenlautsprecher arbeiten bekanntlich nach dem Prinzip des massege-

hemmten Wandlers, bei dem ein Großteil der Antriebsleistung zur Überwindung der Massenträgheitskräfte verbraucht wird.

Nur wenige Lautsprecher mit sehr stabilen, leichten Membranen und exzellentem Impulsverhalten sind daher zur Kombination mit Elektrostaten geeignet.

Um die nötigen Membranamplituden und damit ungewünschte Verzerrungen in engen Grenzen zu halten, ist der Einsatz eines Baßhorns sehr empfehlenswert.

Besondere Bedeutung gewinnt bei solchen Kombinationen die Frequenzweiche, die den Wandlern die entsprechenden Frequenzbereiche zuführt.

Eine Frequenzweiche mit ungenügender Filtersteilheit ist für den Klang ebenso ruinös wie eine Frequenzweiche mit schlechtem Impulsübertragungsverhalten. Eine gelungene Kombination bietet dagegen alle Vorteile eines Elektrostaten mit besseren Baßwiedergabeeigenschaften bei erheblich geringerem Platzbedarf.

Gibt es bei allen Vorteilen dieser Elektrostaten eigentlich keine Nachteile?

Durch die relativ große Strahlerfläche wird der Schall stark gerichtet abgestrahlt. Diese oft als negativ beurteilte Eigenschaft bedeutet aber auch, daß Reflektionen von den Raumwänden kaum stattfinden können. Dadurch werden klangliche Überlagerungen von Aufnahme- und Wiedergaberaum vermieden. Der Wiedergaberaum bleibt praktisch ausgesperrt, ähnlich wie es bei Kopfhörerwiedergabe erlebt wird, der nur den Aufnahmeraum reproduziert und sonst nichts.

Die Folge ist, daß elektrostatische Wandler sehr genau auf den Hörplatz ausgerichtet werden müssen, damit er so gut klingt, wie er kann. Diese Einschränkung des Hörbereichs wird jedoch von denen, die nur auf die absolute Klangqualität achten, nicht als störend empfunden.

Das Römer ELS-Hornsystem ist ein Beispiel für ein Hybridsystem von Elektrostat und Schwingspulenlautsprecher.

Im unteren Frequenzbereich wird ein Podszus-Görlich Chassis eingesetzt (s. Lsp.-Handbuch, Kap. Podszus-Görlich Lautsprecher). Durch die extrem leichte und verwindungsfreie Hartschaummembran besitzt dieses Chassis elektrostatenähnliche Klangeigenschaften und eignet sich daher besonders zur Kombination mit Elektrostaten. Durch den Einsatz eines kleinen Back-Loaded Baßhorns mit angepaßtem Subwoofer genügt ein Membrandurchmesser von 20 cm zur Baßwiedergabe, was natürlich dem Impulsverhalten im gesamten Arbeitsbereich zugute kommt.

Um die Qualität des verwendeten Elektrostaten optimal ausnutzen zu können, werden diese mittels einer von R. A. E. speziell für Elektrostaten entwickelte Röhrendstufe eingesetzt, die den sonst nötigen Eingangsübertrager überflüssig macht.

Das Gesamtergebnis ist ein Baßhorn, das manchmal wie ein Elektrostat klingt und ein Elektrostat, der wie ein Baßhorn klingt.

R. A. E. ELS-Hybridbaßhörner. Ein Schritt weiter zur Realität.

Gegen-Kopplungen

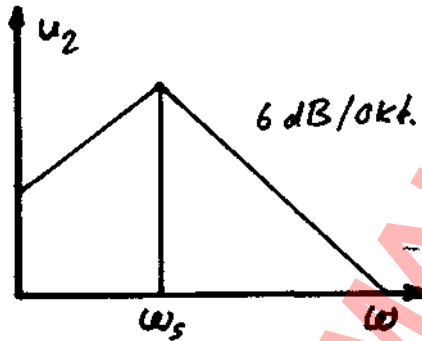
Dieser ehemals technische Begriff ist im Bereich der Lautsprechertechnik mittlerweile zum Werbeschlagwort reduziert worden. An Betrachtung dessen, was die Gegenkopplung leisten soll, ist man geneigt, an Wunder zu glauben. Andererseits machen Regelschaltungen mit bekannter Eigenwilligkeit oft genau das Gegenteil von dem, wofür sie gebaut werden. Dadurch wird das Ganze schon wieder ein bißchen fragwürdig. Um die sinnvollen Gegenkopplungsschaltungen von ihren werbewirksamen Kollegen zu trennen, sind einige Kenntnisse der Materie nötig. Die folgenden Ausführungen sind aus diesem Grund etwas umfangreicher, enthalten dafür aber mit der vorgestellten Schaltung den ersten Teil der R A E „Aktivitäten“, die Gegenkopplungsschaltung für Tieftonsysteme in unseren Aktivboxen.

Diese Schaltung eignet sich ebenso für Subwoofer wie für die Tief- und den unteren Mitteltonbereich in aktiven Mehrwegboxen. Wie sich zeigen wird, muß dabei leider auf Spezialchassis zurückgegriffen werden, Patentlösungen mit herkömmlichen Chassis scheiden bereits bei den ersten Überlegungen aus.

Derartige Versuche sind oft unternommen worden, meist mit Lautsprecherchassis mit zwei Schwingspulen, die Unlösbarkeit einiger Probleme hat die Entwickler jedoch schnell wieder auf den Boden der Tatsachen geholt. Zweifellos liefert das Chassis mit zwei Schwingspulen ein Signal, dessen Spannung der Schwingspulengeschwindigkeit proportional ist, leider ist dieses Signal nicht das Einzige, was diese Spule zu bieten hat.

Ein kurzer Test an einem solchen Chassis mit blockierter Membran zeigt einen beeindruckenden Anteil störender Signale. Da zwei Spulen in enger magnetischer Kopplung in einem hochpermeablen Kern angeordnet sind, gleicht die Konstruktion auf den ersten Blick einem Transformator. Wie bei diesem wird das Musiksignal der Antriebsspule in die Abtastspule induziert. Besonders ärgerlich wird dieser „Trafo-Effekt“ der elektromagnetischen Kopplung, wenn sich die Lautsprechermembran (und Schwingspulen) bewegen darf. Die Kopplung wird augenblicklich ortabhängig, da sich die Position der Spulen zum permeablen Kern ändert. Da die Bewegung der Spulen bei einem Lautsprecherchassis von der Lautstärke und/oder der Frequenz abhängig ist, kann man über den störenden Signalanteil der Abtastspule keine genauen Aussagen treffen. Da aber dieses Storsignal vollständig vom Gesamtsignal abgezogen werden muß, um das Geschwindigkeitssignal (Bewegung) zu erhalten, kann eine solche Schaltung nicht besonders gut funktionieren. Nur wenn das Geschwindigkeitssignal groß gegen den Storteil ist, ist ein halbwegs brauchbares Signal für Regelungszwecke vorhanden.

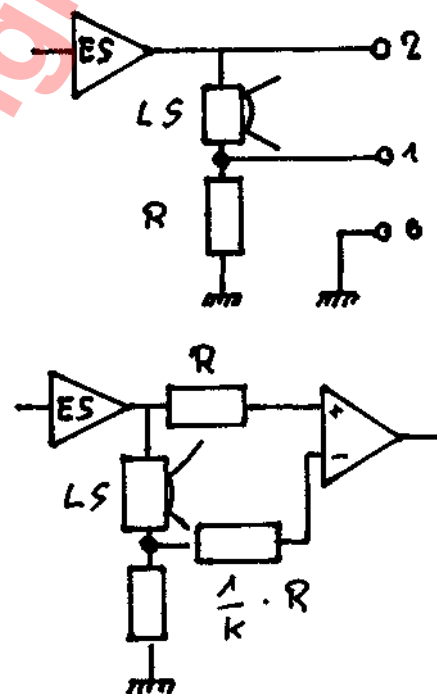
Da die Membranauslenkung bei einem Lautsprecherchassis für gleiche abgegebene und eingespeiste Leistung oberhalb der Resonanzfrequenz im Quadrat zur Frequenz abnimmt, wird auch das Geschwindigkeitssignal immer geringer. Eine zweite Spule als Abtaster funktioniert eigentlich nur in unmittelbarer Umgebung der Resonanzfrequenz oder zur Demonstration, wie es nicht funktioniert.



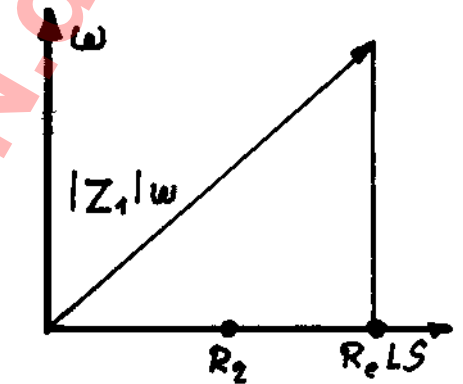
Es ist sinnvoller, direkt mit dem Ausgangssignal des Endverstärkers zu arbeiten, beispielsweise mit folgender, noch recht einfacher Schaltung. Der Lautsprecher und der Widerstand stellen einen Spannungsteiler dar. Je nach den Werten von L und R liegt an den Punkten 0 und 1 eine Spannung an, die einen bestimmten Bruchteil der Ausgangsspannung der Endstufe entspricht (er sei $U_{01} = 4 \text{ UA}$), zwischen den Punkten 0 und 2 liegt eine Spannung an, die der Summe von Ausgangsspannung und der, in der Schwingspule induzierten, Spannung entspricht. Bildet man eine gewichtete Differenz beider Spannungen, so bleibt, wenn k gut eingestellt ist und konstant bleibt, nur die in die Antriebsspule induzierte Spannung U , übrig.

$$U_{,2} - k \times U_{01} = U,$$

Schaltungstechnisch sieht das Ganze ungefähr so aus:



Bisher ist diese Schaltung allerdings auch nur ein Schritt in die richtige Richtung. Als nächstes muß der Einfluß des Blindwiderstandsanteils der Schwingspulen eliminiert werden, andernfalls wäre ein Abgleich nur für eine Frequenz möglich. Das Lautsprecherchassis ist eine komplexe Last mit einem Realanteil R_c , dem Gleichstromwiderstand der Schwingspule, und einem frequenzabhängigen induktiven Anteil L_y . Im Diagramm sieht das so aus:

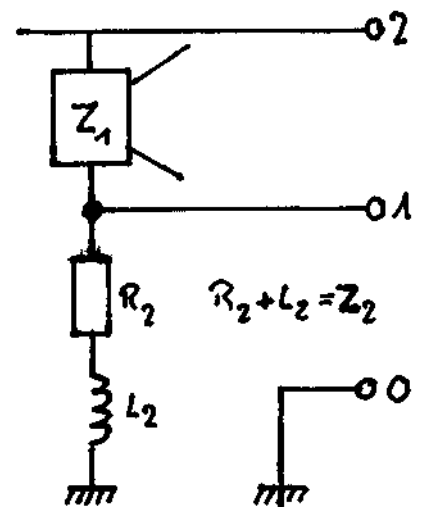


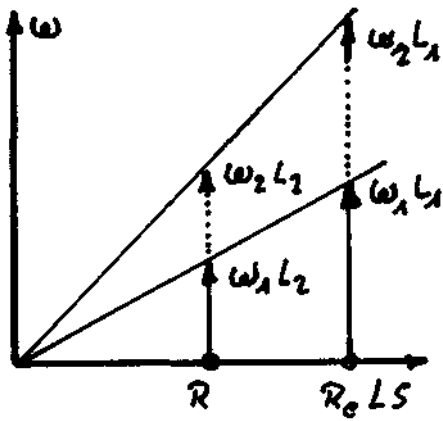
$$|Z_1| = f(\omega)$$

$$|Z_{R_2}| = \text{constant}$$

Der Widerstand des Lautsprechers ist eine Funktion der Frequenz, der Widerstand R bleibt dagegen konstant. Erst eine Erweiterung der Schaltung verhilft zu brauchbaren Ergebnissen, bei richtiger Dimensionierung der Spule L_2 zeigt das Diagramm folgendes:

Wenn beide Impedanzen auf Geraden liegen, die durch Null verlaufen, kann frequenzunabhängig eine Differenz gebildet werden, die den Wert Null aufweist (Zustand optimal, Regelvorgang beendet). Der richtige Weg für L_2 ist zwar nicht leicht zu finden, aber es geht.



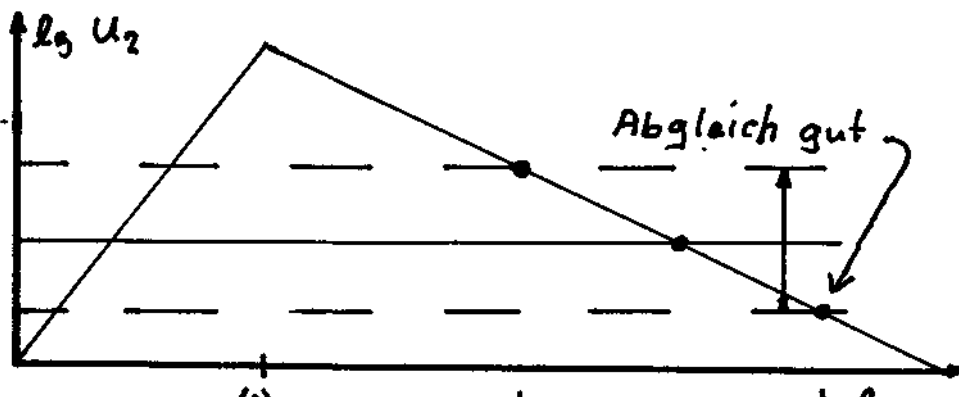
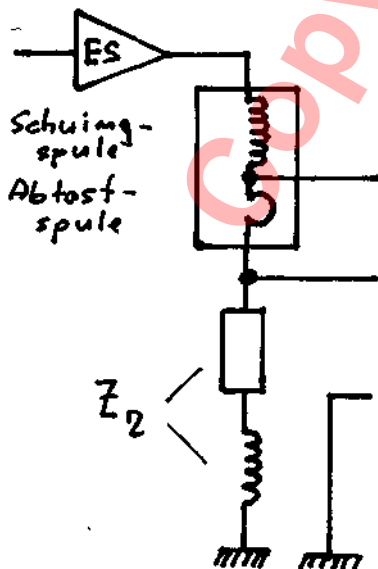
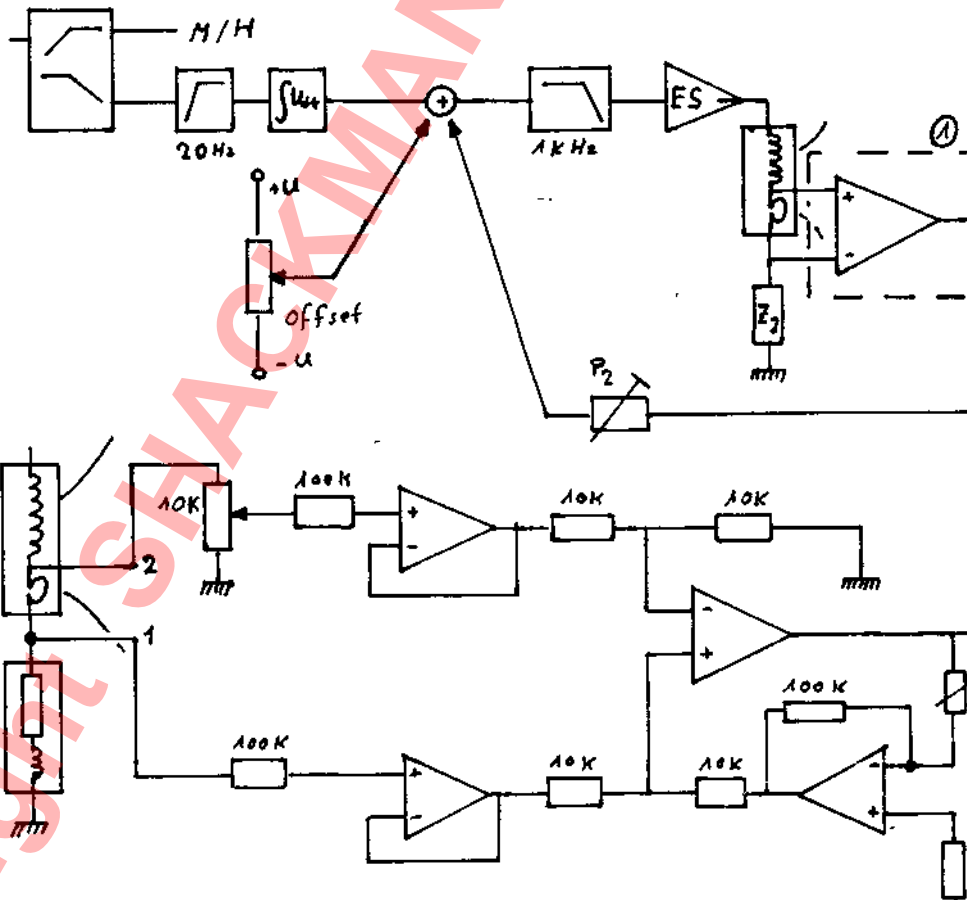


Ein weiterer Punkt ist dagegen nicht so leicht zu lösen: die thermischen Probleme derartiger Schaltungskonzepte. Der spezifische Widerstand des Kupfers ist eine Frage der Temperatur, und das ganz ordentlich. Da an Lautsprecherschwingspulen Temperaturen von über 150°C auftreten können, gerät der komplexe Spannungsteiler aus dem Gleichgewicht. Anders als bei der Induktivität ist ein identischer Temperaturgang von Z_1 und Z_2 kaum praktikabel. Dafür müßten beide Widerstände die gleiche Wärmekapazität besitzen und thermisch eng gekoppelt werden. Gleiche Wärmekapazität ist leicht realisierbar, die enge thermische Kopplung bringt dann aber wieder die bereits bekannte zweite Spule.

Die Lösung des Problems ist, um das lange Nachdenken nicht zu wiederholen, ebenso genial wie einfach. Es gibt Metalle, deren spezifischer Widerstand nicht besonders temperaturabhängig ist, Konstantan zum Beispiel. Eine zusätzliche Windung aus Konstantan genügt bereits, um ein Signal zu erzeugen, welches nicht temperaturabhängig ist. Eine Windung ist im Prinzip auch schon eine Spule; die induzierte Störspannung ist aber, wie bei einem Transformator, vom Verhältnis der Windungszahlen abhängig. Aus diesem Grund ist das Storsignal erheblich kleiner als bei einer zweiten identischen Spule, und die Regelung funktioniert auch im Mitteltonbereich noch sehr gut. Leider hat Konstantan einen relativ hohen Widerstand, sodaß der Einsatz von Konstantandraht wenig sinnvoll ist (Rei-

henschaltung s. Zeichnung), ein kompletter Schwingspulenträger aus Konstantanblech statt der üblichen Papier oder Aluträger ist dagegen sehr gut für diese Aufgabe geeignet. Das Ergebnis ist eine Compound-Spule mit einem Teil aus Kupfer für den Antrieb und einer Spule aus Konstantanblech mit guten thermischen Eigenschaften, die aber keinen nennenswerten Einfluß auf den Antrieb hat. Die entsprechende Elektronik sieht in etwa so aus:

Das untere Diagramm zeigt die Bedeutung des Abgleichs der Schaltung. Bei ordnungsgemäßem Abgleich arbeitet die Regelung auch bei Frequenzen über 500 Hz noch einwandfrei. Dafür ist allerdings ein großer Meßgerätepark notwendig. Beim Einsatz als Subwoofer ist auch ein Abgleich mit einfachen Mitteln möglich.



Frequenzweiche

Eins vorweg! Selbst wenn von den technischen Daten her keine Zweifel über die Qualität der konzipierten Box bestehen, sollte niemand dem Irrtum unterliegen, eine optimale Frequenzweiche sei einfach mit dem Taschenrechner kalkulierbar. Um sich selbst vor Enttäuschungen zu schützen, sollte jeder wissen, daß jede Frequenzweiche auf rein theoretischem Wege nur grob angenähert ermittelbar ist. Im Grunde läßt sich gar keine Frequenzweiche „errechnen“!! Eine Weiche ist nur komplett neu „entwickelbar“ mithilfe aufwendiger technischer Hilfsmittel, wie Frequenzgenerator, Echtzeitanalysator oder Pegelschreiber höherer Qualitätsstufe, Phasenmesser, Oszilloskop oder ganz wichtig, Polarfrequenzmesser (s. Kap. Studiolausprecher) oder gar schalltoter Raum.

Wer über diese Möglichkeiten gar nicht oder nur zum Teil verfügt, sollte vielleicht fertige Weichenvorschläge (Artnr. 02 oder 200er Endnummer) oder, noch sicherer, auf unsere kompletten Bauvorschläge (800er Endnummern), die komplett bestückte Weichen oder Weichen-Kits enthalten, zurückgreifen.

Doch keine Angst. Auch wenn diese Vorbedingungen als unerreichbar erscheinen, sollte seinen einmal gefaßten Mut behalten, denn es gibt tatsächlich eine einzige relativ einfache Möglichkeit zur Optimierung von Frequenzweichen oder Boxen ganz allgemein: das Ohr!! (wenn man „es“ hat). Nur ist leider (oder zum Glück??) das Ohr kein **absolutes** Meßinstrument (selbst wenn man „das Ohr“ wirklich hätte). Nicht nur die akustische Erinnerungsfähigkeit des Ohres sondern hauptsächlich psychologische Gründe verhindern seine Anerkennung als Meßgerät, denn wer kann sich schon davon freisprechen, *das zu glauben zu hören, was er hören möchte*, positiv oder negativ, ganz egal, geschweige denn, sich von seinem eigenen „Hörgeschmack“ leiten zu lassen.

Deshalb sollte bei der „Verfahrensweise-Ohr“ immer!! eine sogenannte Referenz vorhanden sein. Das heißt, man vergleicht direkt und möglichst ohne zeitliche Verzögerung (sogenannter A-B-Vergleich) die eigene Entwicklung mit einem von uns selbst oder besser von Fachleuten, die nicht unbedingt aus der sogenannten „Hifi-Szene“ stammen müssen (s. so manchen Testbericht in sogenannten „Hifi-Zeitschriften“ oder manche „Hifi-Fachberater“), anerkannten Vergleichslautsprecher (z. B. alle Studio-Monitore oder Abhöreinheiten)!

Die Entwicklung eigener Frequenzweichen

Wie bereits angedeutet wurde, ist es außerordentlich schwierig, eine Frequenzweiche zu „errechnen“, zumindest soweit erhebliche Abweichungen vom theoretischen Idealfall vermieden werden sollten.

Grundsätzlich entscheiden die eingesetzten Lautsprecherchassis über die Ausführung der Frequenzweiche, da die „Frequenzweiche“ nur ein dem Lautsprecher vorgeschaltetes Filter ist, und daher

1. Die Durchlaßkurve des Filters und der Frequenzgang des Lautsprechers sowie der Phasenverlauf zusammen! betrachtet werden muß.
2. Die mechanische und elektrische Belastbarkeit der verwendeten Lautsprecher eine bestimmte Filtersteilheit erfordert.
3. Der frequenzabhängige Widerstand der Lautsprecher (s. Impedanzkurve) die Funktion der Frequenzweiche nachteilig beeinflusst.

Grundsätzlich unterscheidet man verschiedene Filtertypen und verschiedene Flankensteilheiten. Die gebräuchlichsten Filtertypen sind

- a) Chebyshev - Filter
- b) Butterworth - Filter
- c) Bessel - Filter

Die Flankensteilheit wird angegeben in dB/oktave und gibt an, wie die Spannung am Lautsprecher im Sperrbereich des Filters reduziert wird.

Butterworth-Filter

n	L ₁	(Q)	L ₂	(C ₁)	L ₃	(C ₂)	L ₄	(C ₃)	L ₅	(C ₄)	(C ₅)
1	1	(1)									
2	1,41	(0,707)	1,41	(0,707)							
3	1,5	(6,67)	0,75	(1,33)	0,5	(2)					
4	1,531	(0,65)	0,63	(1,577)	1,082	(0,92)	2,61	(0,383)			
5	1,545	(0,64)	0,59	(1,694)	1,382	(0,72)	1,12	(0,894)	0,309	(3,24)	

Bessel-Filter

n	(C ₁)	L ₂	(C ₂)	L ₃	(C ₃)	L ₄	(C ₄)	L ₅	(C ₅)
1	1	(1)							
2	1,362	(0,734)	2,204	(0,454)					
3	1,463	(0,684)	1,187	(0,843)	0,293	(3,417)			
4	1,501	(0,666)	1,022	(0,978)	0,613	(1,632)	4,731	(0,211)	

Chebyshev-Filter

n	L ₁	(C ₁)	L ₂	(C ₂)	L ₃	(C ₃)	L ₄	(C ₄)	L ₅	(C ₅)
1	1,000	(1,000)								
2	1,303	(0,768)	0,839	(1,191)						
3	1,652	(0,605)	0,685	(1,460)	1,108	(0,903)				
4	1,377	(0,726)	0,488	(2,051)	1,517	(0,659)	0,887	(1,127)		

Um aus den Tabellen die jeweils richtigen Werte für L₁ z₁ z₃ zu erhalten, multipliziere man den Wert L der jeweiligen Spalte der Tabelle mit:

$$\frac{Z}{2 \pi f_c}$$

Um aus den Tabellen die jeweils richtigen Werte für C₁ z₂ z₃ zu erhalten, multipliziere man den Wert (c) der jeweiligen Spalte der Tabelle mit:

$$\frac{1}{2 \pi f_c Z}$$

Z = Schwingungspulen-Impedanz

f_c = gewünschte Übernahme-Frequenz.

L_{1,2,3...} u. C_{1,2,3...} * Diagramm „Filterordnung“

Gebräuchlich sind:

- 6 dB/okt. = Filter 1er Ordnung
- 12 dB/okt. = Filter 2er Ordnung
- 18 dB/okt. = Filter 3er Ordnung
- 24 dB/okt. = Filter 4er Ordnung.

Diese Werte bezeichnen die maximale Abschwächung pro Oktave. Im Bereich der Trennfrequenz des Filters ist die Abschwächung pro Oktave je nach Filtertyp sehr viel geringer. Die Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Anwendungsgebiete der verschiedenen Filtertypen.

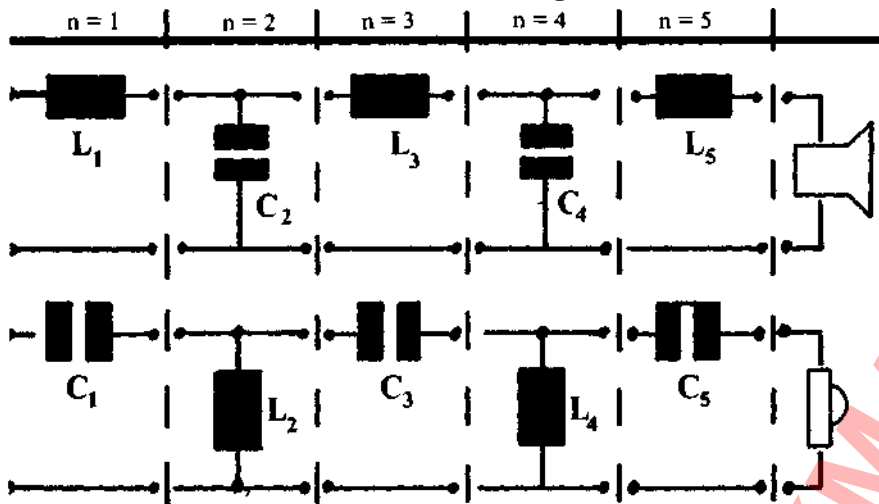
Chebyshev-Filter wurden für die beste Sperrwirkung entwickelt, das Impulsübertragungsverhalten ist allerdings nicht sonderlich gut.

Besselfilter wurden für bestes Impulsübertragungsverhalten entwickelt, die Sperrwirkung im Bereich der Trennfrequenz ist allerdings sehr gering.

Butterworthfilter stellen einen Kompromiß dar, bei guter Sperrwirkung ermöglichen sie ein recht gutes Impulsübertragungsverhalten.

Als Ausgangspunkt für eine Frequenzweichenberechnung für einen „idealen“ Lautsprecher mit linearem Frequenzgang und Phasenverlauf sowie konstantem Widerstand R ist die Filterberechnung nach folgenden Tabellen möglich:

Filterordnung



Abhängig von der Flankensteilheit (Filterordnung) und dem Filtertyp ergeben sich bestimmte Überlappungsbereiche, was zur Folge hat, daß die verwendeten Lautsprecher auch außerhalb ihres eigentlichen Einsatzbereiches noch linear arbeiten müssen. Das führt zu erheblichen Problemen bei der Konzeption der Frequenzweiche.

Der Versuch, das Impulsübertragungsverhalten zu optimieren, führt automatisch zu großen Überlappungsbereichen, da nur Butterworth-Filter 1. Ordnung sowie Bessel-Filter diese Forderung erfüllen.

In diesen Fällen muß der Hochtonlautsprecher noch 2 Oktaven unterhalb und der TT-Lautsprecher noch 2 Oktaven oberhalb der Trennfrequenz f_c arbeiten. Um die Fähigkeiten dieser Frequenzweichen nutzen zu können, muß der Hochtonlautsprecher mechanisch sehr hoch belastbar sein, und der TT-Lautsprecher über ein exzellentes Impulsverhalten verfügen.

Es gibt nur wenige Lautsprecher, die sich mit solchen Frequenzweichen einsetzen lassen.

Butterworth-Filter höchster Ordnung „entlasten“ die verwendeten Systeme erheblich, da durch die höhere Flankensteilheit der Tieftonlautsprecher nicht als Mittel- oder Hochtonlautsprecher mißbraucht wird, das Impulsverhalten wird dadurch jedoch, gemessen an den oben genannten Weichen nachteilig beeinflusst.

Frequenzweichen dieser Art sind daher immer ein mehr oder weniger gelungener Kompromiß, wobei die gelungenen Kompromisse das Ergebnis einer aufwendigen Entwicklung sind und sich die praktisch eingesetzten Frequenzweichenbauteile erheblich von denen eines theoretisch idealen Butterworthfilters unterscheiden können.

„Filiert Driver“

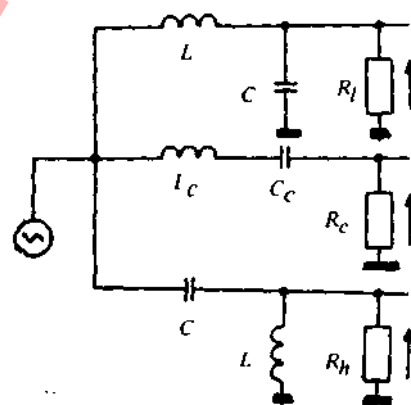
Eine Analyse der Vor- und Nachteile beider Systeme führte zur Entwicklung der „Filiert Driver Networks“. Hier sollen die Nachteile der Butterworthfilter höherer Ordnung durch ein zusätzliches System, dem „Filiert Driver“ eliminiert werden.

Die bessere Belastbarkeit der Lautsprechersysteme und die theoretische Fähigkeit, Rechtecksignale zu übertragen, zeichnen diese Frequenzweichen aus, allerdings steht und fällt auch hier die Qualität der Kombination mit der Qualität und Anordnung der verwendeten Systeme.

Der „Filiert Driver“ muß über vier Oktaven linear arbeiten, eine Forderung, die von guten Mitteltonlautsprechern erfüllt wird, und beim Einsatz als Filiert Driver in einer 18 dB Weiche gegenüber den Tief- und Hochtonlautsprechern einen um 6 dB höheren Wirkungsgrad aufweisen.

Da der Filiert Driver grundsätzlich über einen 6 dB/okt. Bandpass betrieben wird, muß das verwendete Lautsprechersystem über eine hohe mechanische und elektrische Belastbarkeit verfügen sowie ein hervorragendes Impulsverhalten besitzen.

Filiert Driver Network 12 db/Oktave



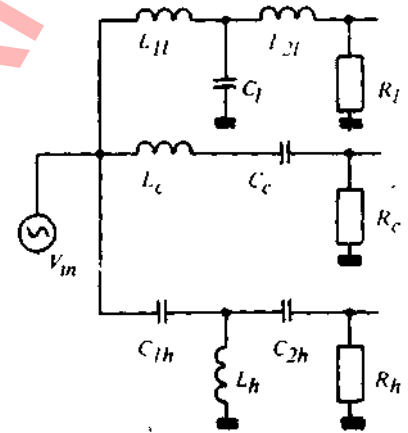
$$L = \frac{\sqrt{2} \times Z}{2 \pi \times f_c}$$

$$L_C = \frac{Z}{\sqrt{2} \times 2 \pi \times f_c}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{2} \times 2 \pi \times f_c \times Z}$$

$$C_C = \frac{\sqrt{2}}{2 \pi \times f_c \times Z}$$

Filiert Driver Network 18 db/Oktave



$$L_{1L} = \frac{3Z}{4 \pi \times f_c}$$

$$L_{2L} = \frac{Z}{4 \pi \times f_c}$$

$$L_C = \frac{Z}{2 \pi \times f_c}$$

$$L_H = \frac{3Z}{8 \pi \times f_c}$$

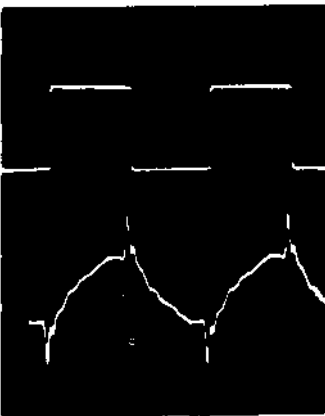
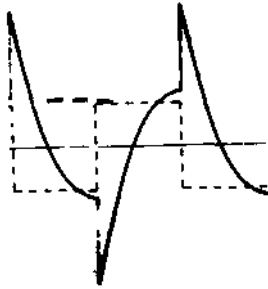
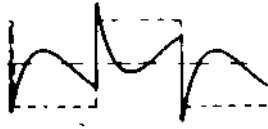
$$C_L = \frac{4}{6 \pi \times f_c \times Z}$$

$$C_C = \frac{1}{2 \pi \times f_c \times Z}$$

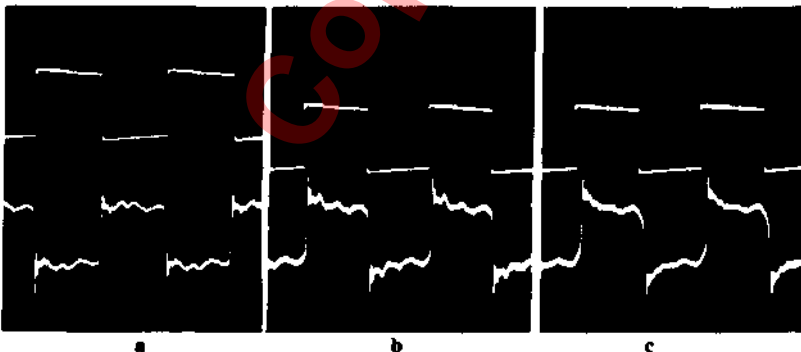
$$C_{1H} = \frac{2}{6 \pi \times f_c \times Z}$$

$$C_{2H} = \frac{2}{2 \pi \times f_c \times Z}$$





Lautsprecherchassis nicht in Phase.



Rechteckverhalten einer optimierten "Filler-Driver"-Kombination

a) Auf der Achse

b) 15° neben der Achse

c) 30° neben der Achse

Die Rückwirkung des verwendeten Lautsprecher-Systems auf die Frequenzweiche ist bei allen passiven Frequenzweichtypen ein Effekt, der keinesfalls unterschätzt werden sollte.

Die Schwingspuleninduktivität jeder Lautsprecher-Schwingspule bewirkt einen frequenzabhängigen Anstieg des Lautsprecherwiderstandes zu hohen Frequenzen. Dieser Anstieg kann die Wirkung der Spule in einer 6 dB Frequenzweiche fast vollständig aufheben.

Ebenso kann ein Anstieg des Widerstandes im Bereich der Resonanzfrequenz des Lautsprechers die Wirkung des Kondensators in einer 6 dB Weiche aufheben. Bei Frequenzweichen höherer Ordnung sind die Auswirkungen geringer, jedoch keineswegs vernachlässigbar.

Ein weiteres Problem wird bei der Verwendung von 12 dB/okt. Frequenzweichen oftmals hörbar.

Die Schwingspuleninduktivität bildet mit dem Parallelkondensator der Weiche einen Schwingkreis, der die Funktion der Frequenzweiche beeinträchtigen kann.

Außerdem sollte grundsätzlich bei allen Bemühungen, eine Frequenzweiche zu optimieren, niemals vergessen werden, daß die Lautsprecher-Systeme nicht alle Frequenzen in alle Richtungen gleich abstrahlen.

Für jeden Punkt in der Umgebung einer Lautsprecherkombination, somit auch für alle indirekten Schallanteile, die als Folge der Reflektion von Raumwänden gehört werden, bildet sich ein Summsignal, abhängig von der abgestrahlten Leistung und der Strahlungscharakteristik der jeweiligen Systeme. Dieses Signal ist nicht identisch mit dem Signal, das der Lautsprecher direkt nach vorne abstrahlt. Die Abhörposition und die Aufstellung der Lautsprecher im Raum sollten daher sorgfältig gewählt und während der Entwicklung einer Frequenzweiche unbedingt beibehalten werden.

Pegelabsenkung

Sehr oft muß der Pegel von Mitteltöner oder Hochtöner abgesenkt werden, weil sie lauter sind als der Baß.

Leider wird häufig der Fehler begangen, einfach einen Widerstand in Reihe zum Lautsprecher zu schalten. Dies ist völlig falsch, weil

- sich der Gesamtwiderstand ändert und damit die Weiche nicht mehr stimmt.
- dadurch das Ein- und Ausschwingverhalten der Lautsprecher verschlechtert wird.

Deshalb muß also ein zweiter Widerstand parallel geschaltet werden, sodaß sich folgende Schaltung ergibt:

Berechnet werden die Werte von R_1 und R_2 folgendermaßen.

$$R_1 = R_L \cdot \frac{R_L}{D} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{R_L}{D - 1} \quad (2)$$

R_L Gleichstromwiderstand der Schwingspule

D Dämpfungsgrad absolut

Soll der Dämpfungsgrad D logarithmisch (DCJB) angegeben sein, so gilt:

$$D_{dB} = 20 \log D \quad (3)$$

$$D = 10^{\frac{D_{dB}}{20}}$$

Rechenbeispiel:

Ein Hochtöner mit dem Gleichstromwiderstand von 4Ω soll um 2dB abgesenkt werden.

$$D_{dB} = 2$$

Durch Einsetzen in (3) erhält man:

$$D = 10^{\frac{2}{20}} = 10^{\frac{1}{10}} = 1,2589$$

Dieses Ergebnis wird in (1) und (2) eingesetzt.

$$R_1 = 4 \cdot \frac{4}{1,2589} = 0,822\Omega$$

$$R_2 = \frac{4}{1,2589 - 1} = 15,45\Omega$$

Weichenbauteile

Die geeignetsten Kondensatoren für hochwertige passive Frequenzweichen sind Folienkondensatoren und MP-Kondensatoren. Sie fügen aufgrund ihres optimalen Cos Phi-Faktors dem Eingangssignal keine Fälschungen hinzu und sind zudem selbstheilend und nahezu verlustfrei. Kondensatoren sind in verschiedene Folientypen zu unterscheiden. Die besten sind unter anderem: POLYPROPYLEN, Polyester, metallisiertes Polyester, Polycarbonat etc. Die Kurzbezeichnungen hierfür sind: MP, MKS, MKP, MKBS etc. Für NF-Zwecke in passiven Weichen ziehen wir MP, MKS, MKBS und für allerhöchste Ansprüche MKP vor.

Für tiefe Übergangsfrequenzen werden allgemein MP-Becher Kondensatoren verwendet, da diese bei vergleichsweise niedrigem Preis mit den erforderlichen Spannungswerten erhältlich sind. Für höhere Übergangsfrequenzen werden Kunststoff-Folien-Kondensatoren gewählt (MKP, MKS, MKBS), ebenso, um MP-Kondensatoren durch Hinzuschalten auf die exakten Werte zu bringen.

Allgemein sei noch auf folgenden wichtigen Sachverhalt hingewiesen: Das wichtigste beim Bau der Weichen ist nicht das %ige Einhalten der Werte, sondern vielmehr die Gleichheit beider Weichen, d. h. daß exakt gleiche Weichen gebaut werden müssen. Der Haupteffekt ist in der räumlichen Abbildung des Programms, sowie in der Durchsichtigkeit zu beobachten!! Ebenso sollten natürlich alle verwendeten Chassis paarweise selektiert sein.

Paarweise selektiert zum Versand kommen bei R.A.E, die Chassis der Marken LOWTHER, HARBETH, PODSZUS, SHACKMAN und R.A.E.!

Für die Spulen in passiven Weichen gilt ähnliches wie für Kondensatoren. Als Bauteile, die im Signalweg liegen sollen, müssen Elemente allerhöchster Qualität verwendet werden, damit die verwendeten Chassis zur vollen Entfaltung kommen können.

Allergrößte Aufmerksamkeit muß auf den Ohmschen Widerstand (Gleichstromwiderstand) gelegt werden. Dieser beeinflusst in der Hauptsache das Impulsverhalten und den Wirkungsgrad der Box. Der Widerstand einer Spule kann entweder über die Verwendung großer Drahtquerschnitte oder von Eisenkernen bzw. Glockenkernen verringert werden. Solange es wirtschaftlich vertretbar ist, sollten eisenkernfreie, d. h. Luftspulen verwendet werden. Die Gründe sind in den verwendeten Eisenkernmaterialien zu suchen, die bei höheren Leistungen in die Sättigung kommen und, ähnlich dem Tonband, damit übersteuert werden und Verzerrungen produzieren, die leicht hörbar sind. Wer finanziell nicht in der Lage ist, hochwertige Luftspulen zu verwenden, nehme auf jeden Fall Glockenspulen, die unseres Erachtens nach die modernsten Sintermetalle verwenden und damit das geringere Übel darstellen.

Die Qualität Ihrer Box hängt zum überwiegenden Teil von der Qualität der Weiche ab. Da wir an den Entwicklungsarbeiten an den R.A.E.-Weichen trotz längerer Suchens nicht an Luftspulen höherer Induktivität mit dem von uns gewünschten Widerstand herankamen, waren wir gezwungen, diese selbst herzustellen. Selbstverständlich können auch Sie nun von der Qualität der R.A.E. Luftspulen profitieren.

Die in unserem Hause gewickelten Spulen sind in ihrer Form einzigartig. Gewickelt wird mit dem CuL-Draht mit 0,2, 1,2 mm, der geringste Ohmsche Widerstände zuläßt. Die Toleranz unserer Spulen liegt untereinander bei 1%. Dies ist erforderlich, damit

Kondensatoren

01 300	0,68 μ F MKS Folie, 100 V
01 301	1,0 μ F MKS Folie, 100 V
01 302	1,5 μ F MKS Folie, 100 V
01 303	2,2 μ F MKS Folie, 100 V
01 330	2,2 μ F MKS Folie, 63 V
01 304	2,0 μ F MKBS Folie, 380 V
01 305	2,7 μ F MKP 10 Folie, 300 V
01 306	3,3 μ F MKS Folie, 100 V
01 307	3,3 μ F MKS 4 Folie, 400 V
01 308	4,7 μ F MKS Folie, 100 V
01 309	6,8 μ F MKS Folie, 100 V
01 310	8,7 μ F MKS Folie, 100 V
01 311	10,0 μ F MKS Folie, 100 V
01 331	15 μ F MKS Folie, 100 V
01 332	22 μ F MKS Folie, 100 V
01 333	33 μ F MKS Folie, 100 V
01 334	47 μ F MKS Folie, 100 V
01 335	68 μ F MKS Folie, 100 V
01 336	100 μ F MKS Folie, 100 V
01 312	10,0 μ F Tonelko, 63 V
01 313	22,0 μ F Tonelko, 63 V
01 314	47,0 μ F Tonelko, 63 V
01 315	10,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 316	20,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 317	30,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 318	60,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 319	80,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 320	100,0 μ F ELCAP, Falcon, 60 V
01 322	10 μ F Ton ELCO, 100 V
01 323	22 μ F Ton ELCO, 100 V
01 324	33 μ F Ton ELCO, 100 V
01 325	47 μ F Ton ELCO, 100 V
01 326	68 μ F Ton ELCO, 100 V
01 327	82 μ F Ton ELCO, 100 V
01 328	100 μ F Ton ELCO, 100 V

Spulen

01 350	0,25 mH, Luft, 0,12 Ohm
01 351	0,3 mH, Luft, 0,58 Ohm
01 352	0,4 mH, Luft, 0,62 Ohm
01 353	0,5 mH, Luft, 0,65 Ohm
01 354	0,6 mH, Luft, 0,69 Ohm
01 355	0,8 mH, Luft, 0,63 Ohm
01 356	1,0 mH, Luft, 0,55 Ohm
01 357	1,5 mH, Luft, 0,59 Ohm
01 358	2,0 mH, Luft, 0,63 Ohm
01 359	2,5 mH, Luft, 0,69 Ohm
01 370	3,0 mH, Glockenkern Siemens
01 371	4,0 mH, Glockenkern Siemens
01 372	5,0 mH, Glockenkern Siemens
01 373	6,0 mH, Glockenkern Siemens
01 374	7,0 mH, Glockenkern Siemens
01 375	8,0 mH, Glockenkern Siemens
01 376	9,0 mH, Glockenkern Siemens
01 377	12,6 mH, Glockenkern Siemens
01 378	14,8 mH, Glockenkern Siemens, für Harbeth CO 8
01 379	Autotrafo CO 5 Harbeth
01 380	Autotrafo CO 8 Harbeth

Lieferprogramm R.A.E. Luftspulen mit Runddraht 0,2, 2 mm

Art.-Nr.	Art.-Nr.
01 400 bis 0,05 mH	01 421 bis 3,0 mH
01 401 bis 0,1 mH	01 422 bis 3,4 mH
01 402 bis 0,15 mH	01 423 bis 3,7 mH
01 403 bis 2,0 mH	01 424 bis 4,0 mH
01 404 bis 0,25 mH	01 425 bis 4,6 mH
01 405 bis 0,3 mH	01 426 bis 5,0 mH
01 406 bis 0,35 mH	01 427 bis 5,5 mH
01 407 bis 0,4 mH	01 428 bis 6,0 mH

01408 bis 0,5 mH	01429 bis 6,5 mH
01409 bis 0,6 mH	01 430 bis 7,0 mH
01410 bis 0,7 mH	01431 bis 7,5 mH
01411 bis 0,8 mH	01 432 bis 8,0 mH
01412 bis 0,9 mH	01 433 bis 9,0 mH
01413 bis 1,0 mH	01 434 bis 10,0 mH
01414 bis 1,3 mH	01 435 bis 11,0 mH
01415 bis 1,5 mH	01 436 bis 12,0 mH
01416 bis 1,8 mH	01 437 bis 13,0 mH
01417 bis 2,0 mH	01 438 bis 14,0 mH
01418 bis 2,2 mH	01 439 bis 15,0 mH
01419 bis 2,5 mH	01 440 bis 16,0 mH
01420 bis 2,7 mH	01 441 bis 17,0 mH

Dämmstoffe

Art.-Nr.	
01001	Bailey Wolle, langfaserige Naturwolle, für TL + Baßreflex
01002	B.A.F. Wadding, für geschl. Boxen + TL, Breite 1,5 m, Dicke 5 cm
01003	Stopfwatte Visaton, wie 01002, jedoch nicht selektiv wirkend
01006	PRITEX NG/14/2, genoppt,

Lautsprecher-Kabel

01020	Lautsprecherkabel, 2x2,5 eine Ader markiert
01021	wie vor jedoch 2 x 4
01022	
01023	
01024	Lautsprecherkabel 1.200 Adern, 2x4, hochflexibel, absolute Spitze!
01025	Lautsprecherkabel „Dynaudio SUPERFLOW“. transp., 1.400 Adern
01035	
01036	

Verbindungen

01026	Lautsprecheranschlußklemmen, 2-pol. 0 2,5, stabile Ausführung
01028	Anschlußdose rechteckig, 2-pol. Klemmverschluß, 8 x 6 cm
01029	Anschlußdose, rund, 2-pol., Klemmverschluß 0 8 cm
01037	HIRSCHMANN-Polklemme, 0 für 4 mm, Profianschluß für hohe Leistung

Stoffe

01030	Lautsprecherbespannstoff, hochelastisch, Breite 1,6 m, schwarz
01031	wie vor, jedoch braun
01032	Bespannrahmenhalter, 6 Stck. Frau

Sonstiges

01033	Baßreflexrohr, variabel, 0 78 mm, L max 25 cm
-------	---

Mechanikteile

01050i	Einschlagmuttern, M4, 10 Stck
01051	Einschlagmuttern, M6, 10 Stck.
01052:	Rampa-Muffen, M4 10 Stck.
01053	Rampa-Muffen, M6 10 Stck.
01054	Schrauben, M4 10 Stck.
01055	Schrauben, M6 10 Stck.

Regler

0104C1	L-Regler, 30 Watt, MT
01 041	L-Regler, 30 Watt, HT
01 042'	L-Regler, 50 Watt
01043:	L-Regler, 100 Watt

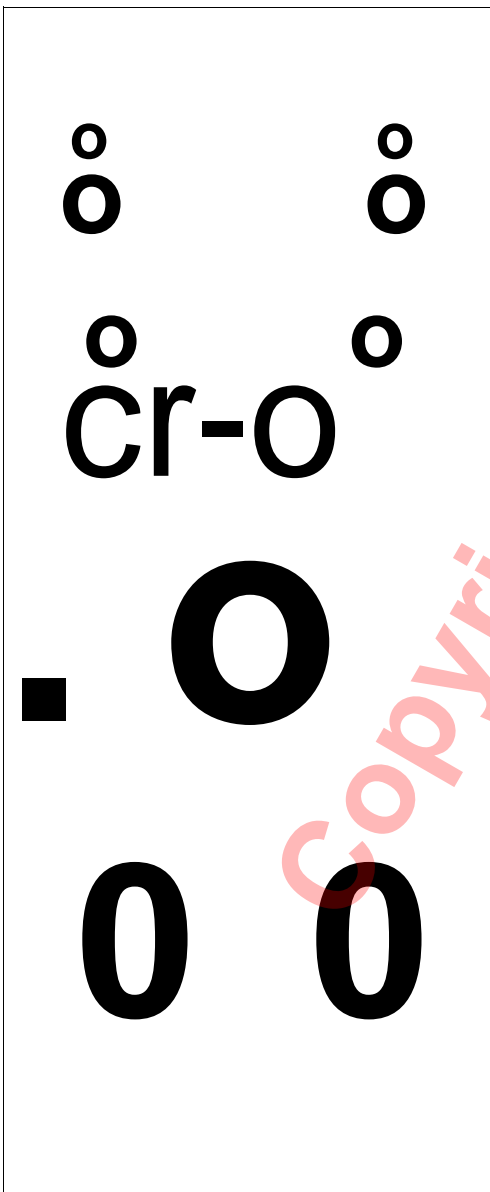
Besser als ein großer Subwoofer sind zwei kleine, deren Aufstellung meist „akustisch“ unproblematischer ist.

Auf dieser Basis gibt es bei R. A. E. ein abgestimmtes Sortiment verschiedener kleiner Lautsprecher, z. B. Harbeth, Görlich, die bei Bedarf durch optimal angepaßte Subwoofer ergänzt werden können. Ebenso können vorhandene Boxen durch DCS-Subwoofer in den Tiefbaßeigenschaften aufgewertet werden. So wird der Kauf kleiner Lautsprecherboxen nicht von Anfang an zur Fehlinvestition, sondern zum Einstieg in ein flexibles System.

Lieferbare DCS-Systeme

11822	DCS 1	20 cm Treiber, 25 cm passiv
11823	DCS 2	25 cm Treiber, 30 cm passiv
11824	DCS 3	30 cm Treiber, 38 cm passiv
11833	DCS 6	Monobaß, 30 cm Baß mit Schwingspulen und 38 cm passiv

Das DCS-System



Superhohtöner sinnlos oder sinnvoll??

Ohne auf die Problematik der Schallerzeugung, Aufnahme und Reproduktion näher einzugehen, gibt es einige Gründe, die für den Einsatz sogenannter Superhohtöner sprechen.

Der wichtigste Grund ist dabei keineswegs die Erweiterung des reproduzierbaren Frequenzbereiches, die erwiesenermaßen oberhalb von 20 KHz nicht mehr wahrnehmbar ist, sondern die Verbesserung der Abstrahlcharakteristik im Bereich vom 10 bis 20 bHz.

Eine Lautsprecherkombination muß ein gleichmäßiges Abstrahlverhalten über einen weiteren Frequenzbereich gewährleisten, damit beim Betrieb in einem Raum keine zu großen, unnatürlichen Differenzen zwischen dem direkten und dem indirekten, von Wänden reflektierten, Schallanteil auftritt. Das menschliche Gehör ist ein außerordentlich sensibles Meßgerät, es unterscheidet deutlich zwischen dem direkten Schallanteil, der das Ohr zuerst erreicht und dem verzögerten indirekten Schallanteil.

Lautsprecher, deren Schalldruckkurven von vorne gemessen vollkommen identisch sind, werden unterschiedlich klingen, solange das Abstrahlverhalten unterschiedlich ist.

Ebenso anders sich natürlich der Klang mit dem Raum und der Aufstellung. Da hohe Frequenzen in der Luft stärker abgeschwächt werden als tiefere, sind die Entfernungen zwischen Lautsprecher — Wand — Ohr ebenso am indirekten Schallanteil beteiligt wie z. B. Vorhänge und Stofftapeten, die die Reflektion hoher Frequenzen verhindern.

Glücklicherweise hat das menschliche Gehör zwei Vorteile, erstens kann es sehen, zweitens verfügt es über Erfahrung.

Jeder weiß wie hallig ein Badezimmer klingt und wäre außerordentlich verwundert, wenn ein solcher Raum plötzlich „schalltot“ wäre.

In diesem Fall entspricht die Akustik nicht der Erfahrung die das Gehirn (und damit das Gehör) bisher mit solchen Räumen gemacht hat. Andererseits sind raumbedingte Klangänderungen nicht störend, soweit sie den Erfahrungen entsprechen.

Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Raumeinflüsse nicht frequenzabhängig sind, oder anders gesagt, daß die Lautsprecherkombination alle Frequenzen mit einem vergleichbaren Abstrahlwinkel reproduziert. Der Abstrahlwinkel eines Lautsprecherchassis ist bei tiefen Frequenzen sehr groß. Solange die Membran kleiner als die abgestrahlte Wellenlänge ist, beträgt er mindestens 180°.

Bei zu hohen Frequenzen beginnt jeder Lautsprecher die Schallabstrahlung zu bündeln, d. h. **gerichtet** abzustrahlen.

Um auch höchste Frequenzen ungerichtet abzustrahlen, muß daher die strahlende Fläche erheblich kleiner sein als die Wellenlänge der höchsten abzustrahlenden Frequenz.

Bei einer Frequenz von 20 KHz mit einer Wellenlänge von 1,7 cm sollte daher die Strahlerfläche nicht mehr als 5 mm Durchmesser haben.

Obwohl die Herstellung eines solchen Lautsprecherchassis mit einer 5 mm Membran grundsätzlich möglich ist, ist dieser Weg leider nicht sehr erfolgversprechend. Da die Strahlerfläche sehr klein ist, sind große Membranamplituden bei hohen Frequenzen nötig. Die dabei auftretenden Massenträgheitskräfte verringern den Wirkungsgrad des Systems erheblich, gleichzeitig ist die Belastbarkeit einer 5 mm Schwingspule sehr gering.

Bei den R.A.E. Superhohtönern SH 26 werden diese Probleme umgangen ohne das Abstrahlverhalten zu verschlechtern.

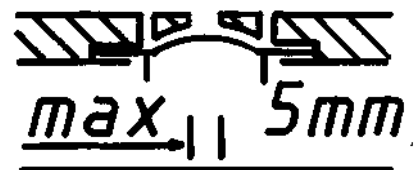
Von der sehr leichten Membran, die einen Durchmesser von 10 mm hat ist eine Aluminiumplatte mit einer 5 mm großen Öffnung angebracht. Bei hohen Frequenzen wird der Schall nur aus dieser Öffnung abgestrahlt, das Abstrahlverhalten ist daher sehr gut.

Bei niedrigen Frequenzen ist diese Öffnung allerdings zu klein. Da mit tieferen Frequenzen auch größere Luftvolumen durch die kleine Öffnung gepreßt würden, wären hörbare Verzerrungen unvermeidlich. Mit einem kleinen Kunstgriff läßt sich das jedoch vermeiden.

Rund um die 5 mm große Öffnung sind Schlitze angebracht, die im Prinzip wie Baßreflex-tunnel wirken. Bei tiefen Frequenzen sind diese Schlitze „akustisch“ offen, bei höheren Frequenzen sperrt die Massenträgheit der Luft in den Schlitzen jeden Strahlungsdurchgang (s. Baßreflexprinzip).

Dieses Konstruktionsprinzip verbindet das geforderte Abstrahlverhalten mit sehr hohem Wirkungsgrad und hoher Belastbarkeit.

Es sollte jedoch immer daran gedacht werden, daß dieser Lautsprecher ein Superhohtöner für den Bereich über 9 KHz ist. Dieses Chassis kann den Hohtöner nicht ersetzen, nur verbessern. Dadurch unterscheidet sich dieser Lautsprecher von den sogenannten Bändchen-(Ribbon)-Lautsprechern, die zwar Frequenzen bis über 40 KHz reproduzieren, deren Abstrahlverhalten aber wegen der großen strahlenden Fläche schlechter ist als das guter Hochtonkollotten.



Synthesen

Aus dem theoretischen Teil des Handbuchs lassen sich einige konkrete Hinweise ableiten. Bei der großen Zahl von Bauvorschlägen ist es nicht einfach, eine vernünftige Entscheidung zu treffen, da nachträgliche Änderungen der Gehäusegröße nur noch schwer möglich sind. Die Gehäusegröße ist aber nach wie vor der entscheidende Faktor für Wirkungsgrad und maximalen Schalldruck, also die Dynamik einer Lautsprecherkombination. Diese Tatsache läßt sich am Beispiel der R.A.E.-Harbeth Lautsprecherboxen zeigen.

zum Beispiel Harbeth ML

Bereits die kleinste Version „Harbeth ML“ klingt dank des Harbeth Chassis ausgezeichnet, ist aber mit dem kleinen 7 Ltr.-Gehäuse nicht für hohe Abhörlautstärken geeignet. Dafür können Durchzeichnung, Auflösung und räumliche Tiefe Maßstab für so manche renommierte Box sein.

zum Beispiel Halbling

Die gleichen Lautsprecherchassis finden auch im R.A.E. „Halbling“ Verwendung (Art.-Nr. 11 825 -11 827). Durch ein größeres Gehäuse wird dabei die Tiefbaßwiedergabe erheblich verbessert. Damit ist diese Lautsprecherbox der ideale Kompromiß für alle, die zugunsten einer detaillierten, räumlichen Stereowiedergabe auf hohe Lautstärken verzichten können. Mit dieser Box sind die Leistungsgrenzen eines 13 cm Chassis erreicht. Eine weitere Vergrößerung des Gehäuses bringt mit dem kleinen Chassis keine Verbesserung mehr. Im Gegenteil, die Belastbarkeit der Box im Baßbereich würde durch diese Maßnahme erheblich reduziert.

zum Beispiel Amor

Durch den Einbau eines zusätzlichen, größeren Baßchassis mit einem entsprechend größeren Gehäuse läßt sich der maximale Schalldruck natürlich vergrößern. Wird die Übernahmefrequenz zum Harbeth Chassis tief genug gewählt, so bleiben dessen klangliche Vorzüge unbeeinflusst. Eine solche Box wie R.A.E. „Amor“ (Art.-Nr. 11 828 -11 832) wäre der optimale Kompromiß für alle, denen ein hervorragendes Auflösungsvermögen ebenso wichtig ist, wie eine saubere Wiedergabe bei Schalldruckpegeln oberhalb der Zimmerlautstärke. Durch eine Kombination des Transmission-Line und Baßreflexprinzips wird eine beeindruckende Tiefbaßwiedergabe trotz des noch relativ kleinen Gehäuses erzielt. (Abmessungen ca. 80 cm H x 25 cm B x 45 cm T). Diese Box zeigt bereits die Grenzen der Baßreproduktion in normalen Räumen (s. Kapitel Raumakustik).

zum Beispiel Rhön

Eine weitere Vergrößerung des Gehäuses, um eine noch tiefere Grenzfrequenz zu erzielen, wäre in den meisten Fällen sinnlos.

Dagegen ist ein größeres Gehäuse mit entsprechend höherem Wirkungsgrad bei gleicher unterer Grenzfrequenz natürlich nie falsch. Das Dynamikverhalten eines solchen Lautsprechers ist bei richtiger Auslegung kleineren Boxen überlegen, da durch den weiter vergrößerten maximalen Schalldruck die Impulsspitzen, die in jedem Musikprogramm vorkommen, noch besser übertragen werden. Ein solcher Lautsprecher klingt noch lebendiger, der Preis dafür ist allerdings nie gering. Um das gute räumliche Auflösungsvermögen der kleinen Lautsprecherchassis mit den kleinen, leichten Membranen nicht zu verlieren, müssen die Chassis und Trennfrequenzen sorgfältig gewählt werden. Bei der R.A.E. „Rhön“ (Art.-Nr. 11 806) wird aus diesem Grund der größere Bruder des Harbeth Chassis, der Typ LF 8 MK 3 eingesetzt, um auch im Mitteltonbereich den nötigen Schalldruck zu erzielen. Auch im Hochtonbereich muß in diesem Fall auf andere, erheblich teurere Chassis zurückgegriffen werden, um eine Dynamikkompensation in diesem Bereich zu vermeiden. Diese Lautsprecher sind die optimale Lösung für alle, die ungern Kompromisse eingehen.

zum Beispiel das DCS-System

Um Fehlinvestitionen zu vermeiden, bietet R.A.E. ab Sommer 1983 mit den DCS Subwoofern (Double Cavity Systems) ein „System im System“ an (Art.-Nr. 11 822 -11 824). Eine Reihe sehr guter, kleinerer Boxen mit „Harbeth“ und Podszus-Görlich Chassis bilden die Basis für ein flexibles Lautsprechersystem. Diese Boxen können mit den „DCS“ Baßeinheiten kombiniert werden. Durch verschiedene Baßeinheiten ist so eine optimale Anpassung an die verschiedenen Ansprüche und Räume möglich (s. auch Kapitel Subwoofer).

Anders als bei den bekannten Subwoofersystemen ist hier der Einsatz von zwei Baßeinheiten vorgesehen, um das bekannte Mono-Baßproblem auszuschalten. Die Baßeinheiten können allerdings auch in einiger Entfernung von den Mittelhochtoneinheiten aufgestellt werden, da die Trennfrequenz sehr niedrig liegt.

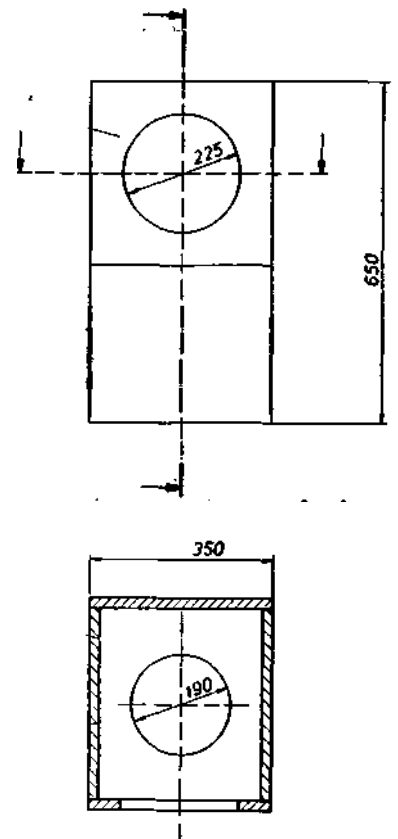
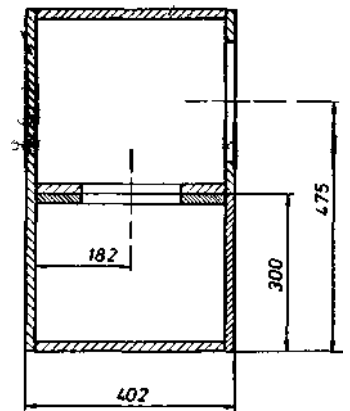
Das DCS-System kann die Physik nicht überlisten. Auch hier bleibt die Größe ein maßgeblicher Faktor, der Vorteil liegt in der Möglichkeit, mit dem Bau kleinerer Boxen zu beginnen und diese später, je nach Ansprüchen und finanziellen Möglichkeiten, durch das DCS-System gezielt zu verbessern.

zum Beispiel Nachbau von Fertigboxen

Beim Nachbau bekannter Fertigboxen gilt hinsichtlich der Gehäuse- und Chassisgröße das oben Gesagte natürlich auch. Bei diesen Bausätzen, in denen z. T. sehr hochwertige Chassis eingesetzt werden, gibt es noch einige Verbesserungsmöglichkeiten. So lassen sich bei Bausätzen statt der serienmäßi-

gen Fertigweichen auch Frequenzweichen mit besseren Bauteilen (2,2 mm Ø Draht, bessere Kondensatoren) einsetzen. Diese Weichen sind zwar teurer, aber der Qualität der Chassis angemessener (s. Kapitel das R.A.E.-Frequenzweichenprogramm).

Auch die Gehäusepläne sind meist auf einfachen Nachbau ausgelegt; mit etwas technischem Geschick läßt sich hier noch viel verbessern. Einige Verstärkungen innerhalb des Gehäuses sind gerade bei geschlossenen und Baßreflexboxen sehr wichtig, da hier keine Faltungsbretter diese Aufgabe übernehmen (vergl. Kapitel Gehäusematerial, Dämmstoffe).



Technische Zeichnung		Menge		Datum	
Blatt	von	Blatt	von	Blatt	von
1	1	1	1	1	1
				DCS 1	



R. A. E. Aktiv wie immer

Unsere ausgesprochene Abneigung gegen Aktivboxen ist mit Sicherheit keinem, der uns kennt, verborgen geblieben. Wir haben zu viele schlechte Erfahrungen mit verschiedensten aktiven Frequenzweichen und Verstärkern gemacht, um diese Aktivkonzepte im Selbstbau zu propagieren. Auch die verlockenden Möglichkeiten der aktiven Baßentzerrung haben uns von dieser Meinung nicht abbringen können; dieser Vorteil wiegt die Probleme zusammengewürfelter Komponenten bei weitem nicht auf. Erst mit der Entwicklung eigener Verstärker wie der Röhrendstufe für Elektrostaten und einer Röhrenleistungsstufe ohne Ausgangsübertrager und ohne Ausgangskondensator (ein absolutes Novum im Hifi-Bereich), einer Röhrenvorstufe und einer kleinen Röhrendstufe für den Mitteltonbereich mit 30 W Leistung, sind wir in der Lage, komplett abgestimmte hochwertige Aktivkonzepte zu erstellen. Dabei wird in erster Linie von der aktiven Baßentzerrung unter Berücksichtigung des Gütefaktors 0_{te} der jeweiligen Chassis Gebrauch gemacht. In Verbindung mit qualitativ höchstwertigen Chassis wie Podszus-Görlich lassen sich auch kleine Lautsprecherboxen mit befriedigenden Baßeigenschaften bei gleichzeitig exzellenter Mittelhochtonwiedergabe realisieren.

Demnächst lieferbar sind:

R. A. E. „Artaris“ mit Podszus-Görlich TT 245/37, Podszus-Görlich MT 130/25 und Focal T 120 FC als Klein & Hummel OY Monitor Replica

„Thurin“ doch mit Podszus-Görlich TT 200/37, Podszus-Görlich MT 130/25 und

Focal T 120 FC als kleinere Version dieses Monitors. Diese Box ist insbesondere auch für alle diejenigen interessant, die bereits das Podszus Hörn nach Elrad gebaut haben und mit dem Klang nicht zufrieden sind. Dies gilt im übrigen auch für das Romer-ELS-Horn, das

Römer „ELS-Satellit“ mit Podszus-Görlich TT 200/37 und Shackman Elektrostat, als Regalversion des R. A. E. ELS-Horns.

Die notwendige Baßentzerrung kann dabei wahlweise im R. A. E. Endverstärker oder bei vorhandenem Endverstärker im R. A. E. Vorverstärker realisiert werden.

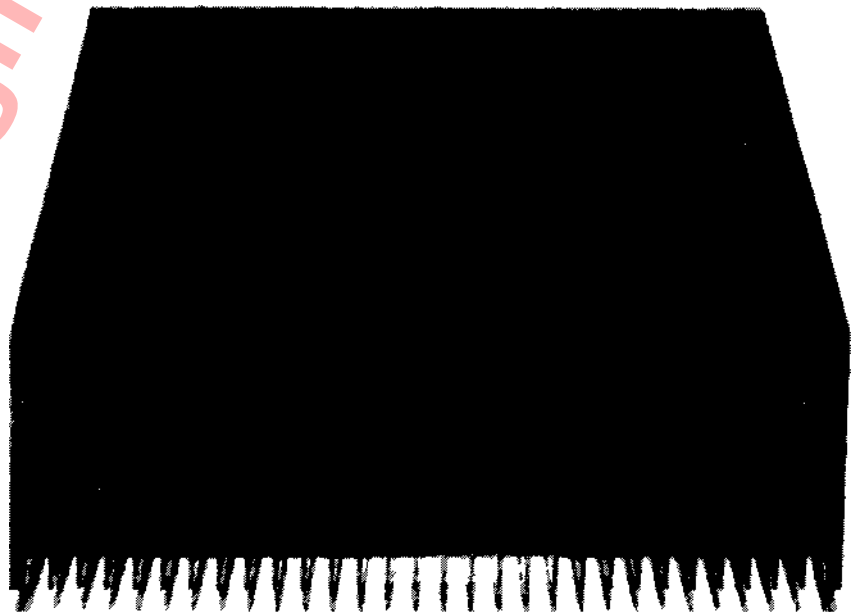
Weiterhin ist für alle, die ihre Elektronik nicht umstellen mochten, neben den bekannten R. A. E. Lautsprecherboxen eine Podszus-Görlich Compound-Box mit dem TT 245/37, Podszus-Görlich MT 130/25 und Focal und Innentreiber in der Entwicklung. Eine Bestückung mit Elektrostaten ist ebenfalls vorgesehen. Diese Entwicklung wendet sich an alle, die den Platz für die Römer ELS-Hörner nicht erübrigen können.



OTL-Röhrendstufe



Röhrendstufe mit Übertrager



Transistorendstufe

R. A. E. Transistorendstufe Leistung 300 W an 8 Ohm durch Brückenbetrieb auch auf trennbar in 2 x 150 W Stereoendstufe.

PODSZUS LAUTSPRECHER SYSTEM PODSZUS - GÖRLICH

Lautsprecherchassis nach System Dr. Podszus-Görlich

Die Suche der Lautsprecherhersteller nach immer neuen Membranmaterialien beweist ebenso, wie die erheblichen Klangunterschiede mancher Lautsprecher mit identischem Antrieb, wie entscheidend der Einfluß des Membranmaterials auf den resultierenden Klang des Lautsprechers ist.

Daher wird in neuerer Zeit einem Lautsprechersystem immer mehr die Ehre zuteil, die ihm schon lange gebührt hätte; dem Sandwich-Lautsprecher Dr. Podszus. Warum?

Die Probleme bei der Entwicklung optimaler Lautsprechermembranen resultieren aus den divergierenden Forderungen nach geringer bewegter Masse bei gleichzeitig möglichst hoher Festigkeit.

Weiterhin muß das Material eine hohe innere Dämpfung besitzen, damit die unvermeidlichen Resonanzen unterdrückt werden. Die Schallgeschwindigkeit im Material darf zudem nicht zu hoch sein, da diese die Rundstrahleigenschaften bei hohen Frequenzen mitbestimmen.

Erfüllt ein Membranmaterial diese Anforderungen nicht ausreichend, so gibt es kaum Ähnlichkeiten zwischen der Bewegung der Schwingspule und dem abgestrahlten akustischen Signal.

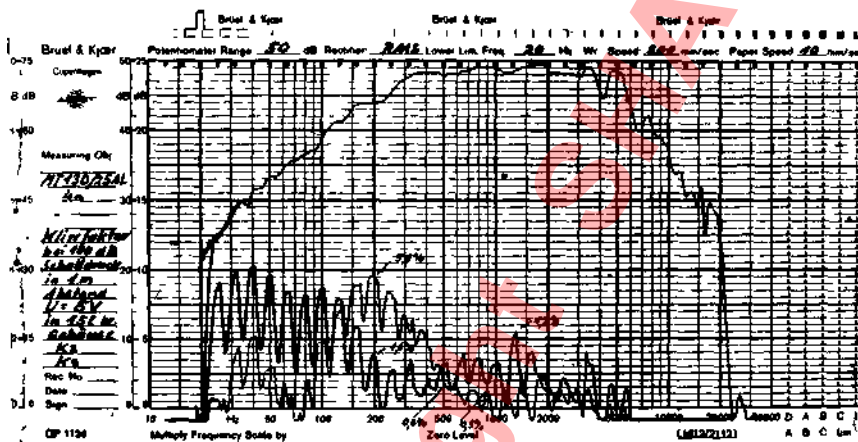
Die besten Magnete und Schwingspulen sind dann ebenso machtlos wie eine Kontrolle der Schwingspulenbewegung (Gegenkopplung), da die Fehler erst am Übergang von der Schwingspule zur Membran oder in der Membran selbst entstehen, auf jeden Fall aber hinter der Schwingspule.

Diese Problematik wurde in der Vergangenheit von Lautsprecherherstellern kaum berücksichtigt. Einige fortschrittliche Firmen versuchten das Eigenleben der Membranen durch spezielle Beschichtungen zu vermindern.

Da jedoch die Beschichtung immer die bewegte Masse der Membranen erhöht, tauchen neue Probleme auf, die sich im niedrigen Wirkungsgrad (SPL) aller Bextrene Lautsprecher beispielhaft darstellen lassen.

Einen völlig anderen Weg beschritt Dr. Podszus bereits Anfang der 50er Jahre. Er hatte bereits damals den überragenden klanglichen Einfluß des Membranmaterials erkannt und in mehreren Patentschriften und Fachaufsätzen einen Lautsprecher mit völlig neuem Membranmaterial vorgestellt.

Ein spezieller Hartschaumstoff mit einer genau bestimmten Hohlraumstruktur wurde auf eine Trägerfolie aus Aluminium gebracht. Dieses Prinzip erfüllt gleichzeitig die Bedingungen sehr hoher Festigkeit und geringster Masse.



Technische Daten

	MT 1300	MT 1300 WG	TT 1700	TT 200/ 25	TT 200/ 37	TT 245/ 37	TT 245/ 37 H
Korbhöhe (mm)	30	30	50	54	54	68	68
Korbdurchmesser (mm)	130	130	170	206	206	250	250
Schallöffnung (mm)	120	120	158	182	182	224	224
Einbautiefe (mm)	65	65	90	90	90	105	105
Magnetische Feldstärke (T)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,25	1,25	1,25
Magnetischer Fluß (mW)	0,59	0,59	0,59	0,59	1,2	1,2	1,2
Luftspaltweite (mm)	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2
Freie Tauchtiefe (mm)	4	4	6	8	8	8	8
Luftspaltenergie (mWs)	280	280	280	280	715	715	715
Magnetgewicht (kg)	0,9	0,9	0,9	1,2	2,5	2,5	2,5
Nennbelastbarkeit (W)	60	60	90	90	120	120	120
Impedanz (Ω)	4/8	4/8	4/8	4/8	4/8	4/8	4/8
Resonanzfrequenz (Hz)	110	62	42	32	32	28	48
Frequenzgang (Hz)	110-8k	60-6k	40-6k	30-4k	30-4k	25-2k	24-2,5k
Klirrfaktor 100 dB	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
Wirkungsgrad (dB)	93	92	92	92	93	93	93
Artikelnummer	36101	36102	26103	36104	36105	36106	36107

Durch die Hohlraumstruktur lassen sich Membranen mit mehreren Millimetern Stärke ohne nennenswertes Gewicht herstellen. Es ist leicht vorstellbar, wie stabil eine solche Membran gegenüber einer Papierfasermembran ist. In langen Versuchsreihen wurde der optimale Kompromiß zwischen Festigkeit und Gewicht ermittelt. Das Ergebnis sind Lautsprechermembranen, die bei einem Durchmesser von beispielsweise 200 mm nur 3,5 Gramm wiegen. Eine vergleichbare Papiermembran wiegt dagegen ca. 20 Gramm.

Die geringe Masse der Membranen kommt dem Impulsverhalten zugute und durch ihren dreidimensionalen Aufbau wird zudem das Auftreten von Partialschwingungen drastisch verringert.

Mit diesen Eigenschaften war Dr. Podszus mit seinen Lautsprechern seiner Zeit weit voraus, denn einige Vorteile seiner Membranen sind erst mit heutigen theoretischen Erkenntnissen und moderneren Meßmethoden erklärbar.

Die Summe all dieser Vorteile erklärt, warum das klangliche Resultat schon seit langem diejenigen begeistert, die keine klanglichen Kompromisse eingehen wollen oder dürfen.

Die ARD setzt diese Chassis ebenso ein, wie Klein und Hummel, Vernissage, Rabox, R. A. E. und viele andere bekannte Lautsprecherentwickler.

Ebenso ist nun auch verständlich, warum der Podszus-Görlich Lautsprecher ein idealer Partner in elektrostatischen Hybridsystemen ist. In überzeugender Weise demonstrieren dies die ELS-Hörner, bei dem eine ideale Harmonie zwischen dynamischen Membranlautsprechern und Elektrostaten erreicht wird.

R. A. E. Lautsprecherboxen mit „Podszus-Görlich“ Chassis

Obwohl die Podszus-Görlich Lautsprecher durch das einzigartige Membranmaterial im Mitteltonbereich kaum zu überbietende Wiedergabeeigenschaften aufweisen, sind diese Chassis bei weitem nicht so oft anzutreffen, wie zu vermuten wäre. Die Ursache dafür liegt in einem kleinen physikalischen Problem aller sehr leichten Lautsprechermembranen. Die Rückstellkraft (Federwirkung) der Luft in einem Lautsprechergehäuse ist von der Größe der jeweiligen Lautsprechermembran abhängig. Aus dieser Federwirkung und der bewegten Masse der Lautsprechermembran resultiert die Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechers. Lautsprecherchassis mit geringster bewegter Masse und sehr leichten Membranen benötigen daher ungeheuer große Gehäuse geringster Federsteife, andernfalls erhöht sich die Resonanzfrequenz auf Werte, die keine brauchbare Baßwiedergabe zulassen. An diesem Umstand ist leider nichts zu ändern, die physikalischen Gesetze gelten bekanntlich auch für Lautsprecherkonstrukteure. Eine Ausnahme machen wie üblich einmal wieder die Elektrostaten, deren bewegte Masse bei tiefen Frequenzen zum größten Teil aus **mitschwingender** Luftmasse besteht. Diese

Masse verringert sich zu hohen Frequenzen hin, bis der Elektrostat praktisch masselos arbeitet. Dieser „Trick“ funktioniert leider nur bei sehr großen Membranflächen, ein derartiger Schwingspulenlautsprecher mit ähnlich geringer Masse ist leider auch mit Podszus-Görlich Membranen aus Festigkeitsgründen nicht mehr realisierbar. Der Elektrostat dessen Membran über die gesamte Fläche gleichmäßig angetrieben wird, hat es da einfacher. Leider sind derartige Elektrostaten wegen der großen benötigten Flächen ebenfalls kaum aufstellbar.

Es gibt daneben allerdings einige andere Möglichkeiten mit leichten Membranen tiefe Frequenzen ohne Pegelverlust abzustrahlen. Eine Möglichkeit ist der Einbau des Lautsprecherchassis in ein Baßhorn, dieses Verfahren ist bereits von den M. F. R. Hörnern bekannt. Leider sind dabei immer noch sehr große Hörner oder Subwoofer unterzubringen.

Unter gewissem Verzicht auf maximalen Schallpegel und Dynamik derartiger Hornkombinationen ist auch eine andere Lösung realisierbar, ein Lautsprechergehäuse mit Innentreiber. Dabei wird die Federsteife des Lautsprechergehäuses künstlich eliminiert und so eine zu hohe Resonanzfrequenz des Tieftonchassis vermieden. Das Lautsprechergehäuse wird dabei in zwei Kammern aufgeteilt und ein weiteres Chassis zwischen den beiden Kammern angebracht. Dadurch wird die Luft zwischen dem Tieftonchassis und dem Innentreiber verschoben statt komprimiert, die Federsteife des Gehäuses existiert für das Tieftonchassis nicht mehr. Gleichzeitig unterstützen sich beide Chassis im Baßbereich. Leider sind solche Lautsprechergehäuse rechnerisch schwer erfaßbar und durch das zusätzliche Chassis auch teurer als konventionelle Boxen. Um dennoch eine Lautsprecherbox mit Podszus-Görlich Chassis und guten Baßeigenschaften ohne zusätzlichen Subwoofer anbieten zu können, haben wir eine solche Box entwickelt. Ein Podszus-Görlich TT 245/37 Chassis erzielt im Verbindung mit den zwei 22 cm Innentriibern eine Baßwiedergabe, die trotz des „kleinen“ Gehäuses dem hohem Niveau der Podszus Chassis angemessen ist.

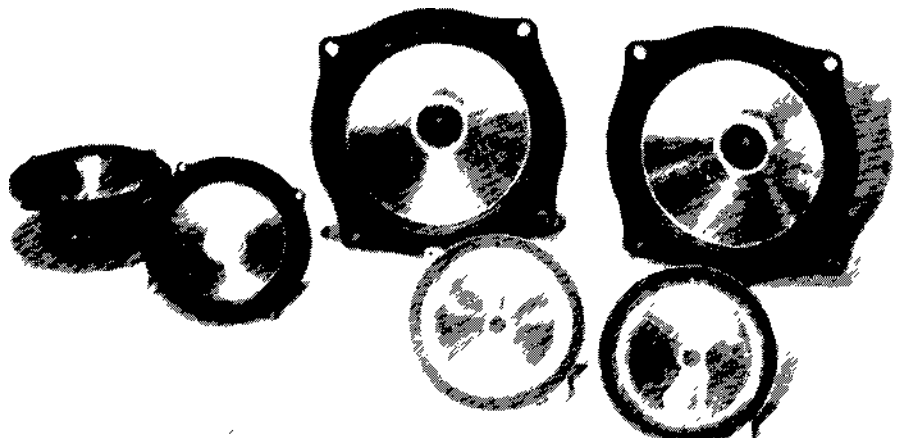
Im Mittel- und Hochtonbereich werden die bereits aus der M. F. R. Serie bekannten Podszus-Görlich MT 130/25 und Focal T 120 FC eingesetzt.

Eine andere Möglichkeit, die Baßeigenschaften kleiner Gehäuse zu verbessern, eröffnet der Einsatz zweier Schwingspulen in einem Lautsprecherchassis. Dieses ebenfalls lange bekannte Verfahren ist durch J. Mahul und seine Firma France-Filiers unter dem Namen Focal mittlerweile weit verbreitet worden.

Durch den Einsatz der zweiten Spule nur im Baßbereich sinkt die Lautsprecherimpedanz auf 4 Ohm ab, das entspricht einer relativen Verdoppelung der aufgenommenen und abgegebenen Leistung. Derartige Boxen können bei gleicher Membranfläche erheblich kleiner gebaut werden als Hornsysteme oder Gehäuse mit Innentreiber, die Baßwiedergabe dieser großen Boxen wird dabei natürlich nicht ganz erreicht. Derartige Boxen sind immer ein erwägenswerter Kompromiß, wenn der Platz für größere Boxen nicht ausreicht. Wir realisieren diesen Kompromiß mit einem speziell für uns gefertigten Podszus-Görlich TT 245/37 Chassis mit zwei 8 Ohm Schwingspulen. Die Bestückung der Box im Mitteltonbereich entspricht dabei den bereits vorgestellten Kombinationen.

Daneben gibt es noch eine Kombination für alle, die zwar einen Subwoofer aufstellen können, aber keinen Platz für die M. F. R. Hornsysteme übrig haben. Mit dem Podszus-Görlich 200/37 Chassis kann eine kleine Satellitenbox aufgebaut werden. Diese Box ist durch die geringen Abmessungen sehr unproblematisch in der Aufstellung und kann mit dem „Shackman“ Elektrostaten oder der Focal-Podszus Mittelhochton-einheit kombiniert werden.

Mit diesen Kombinationen sind wir in der Lage, ein vollständiges Programm Lautsprecherboxen mit Podszus-Görlich Chassis für jeden Anspruch anbieten zu dürfen. Damit ist immer die optimale Lösung realisierbar.



SHACKMAN CONSTANT CHARGE ELEKTROSTATEN

Shackmann Elektrostaten

Die klangliche Unbestechlichkeit von Elektrostaten ist allgemein bekannt. Extrem niedrige bewegte Masse und ein damit verbundenes optimales Impulsverhalten, garantiert ein transparentes, luftiges und detailliertes Klengbild mit einwandfreiem Auflösungsvermögen.

Eines der langlebigsten Modelle dieses Lautsprechertyps ist der Shackman-Elektrostat. Inzwischen ist er bekannt als einer der Welt besten Mittelhochtoneinheiten (s. Klinger RPB 105, Franzis Verlag, Practical Hifi, 2 77) und wird jetzt in Deutschland gefertigt.

Dieser Lautsprecher unterscheidet sich von herkömmlichen Elektrostaten durch verschiedene wichtige Kennzeichen.

Zunächst ist er äußerlich sofort durch seine halbkreisförmige gebogene Bauform, die flache Bauweise mit extra niedrigem Elektrodenabstand zu erkennen. Durch die gebogene Form wird ein für Elektrostaten atypisch gutes Rundstrahlverhalten erreicht. Der minimale Elektrodenabstand sorgt für einen Wirkungsgrad von 93 dB/1 W/ 1 M und erlaubt damit die Kombination mit wirkungsstarken Baßlautsprechern.

Zudem ist die Einheit durch eine geschickte innere Anordnung in mehrere kleine, mechanisch getrennte Einzelsegmente unterteilt. Diese Vorrichtung verhindert mechanisch akustische Resonanzen und verbessert die Wiedergabe der Frequenzen über 15 KHz.

Einige weitere R.A.E.-Modifikationen die sowohl die klangliche Seite als auch die Fertigungsqualität betreffen, sind in der letzten Zeit von uns erreicht worden. So wurden beim UE-Typ Übertrager und Fre-

quenzweiche auf den aktuellen Stand der Technik gebracht bzw. aufwendiger dimensioniert. Die Durchschlagfestigkeit und damit die Belastbarkeit konnte erheblich erhöht werden.

Zudem wurden direktgekoppelte, d. h. übertragerfreie Treiberstufen entwickelt.

Der Shackman T-Typ ist die Transistorversion, der V-Typ eine Röhrenversion. Beide sind in Class-A Technik ausgelegt und beinhalten eine aktive Frequenzweiche, die gestattet, die Box wahlweise halbaktiv oder vollaktiv zu betreiben.

Beide Versionen bedeuten gegenüber der UE-Type eine nochmalige Klangverbesserung.

Hierbei schneidet der V-Typ durch das wärmste Klangbild am besten ab. Gegenüber dem UE-Typ erweitert sich der Frequenzbereich auf über 20 KHz. Außerdem ist im unteren Bereich wesentlich mehr Dynamik vorhanden.

Die fehlenden Übertragerresonanzen und Verzerrungen machen das Gesamtklangbild noch natürlicher und ausgewogener.

Es sollte außerdem nicht außer Acht gelassen werden, daß mit dem Typ T und V verzerrungsfreie Schalldrücke bis an die Schmerzgrenze des Ohres möglich sind, ohne die sonst elektrostatentypische Kompression.

Der Shackman ist in den Modellen WR (ab Dez. 83) und MHT erhältlich, wobei der Unterschied in der unteren Grenzfrequenz liegt (s. Techn. Daten). Dies bedeutet, daß bei der Verwendung des Shackman WR über einen noch weiteren Frequenzbereich die klanglichen Vorteile dieses Lautsprechers genutzt werden können, und somit eine noch höhere Qualitätsstufe erreicht werden kann.

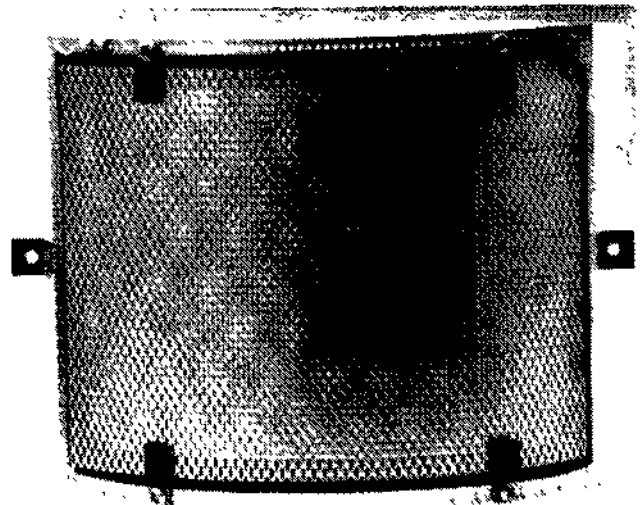
Darüber hinaus ist sowohl die direkt gekoppelte Transistorendstufe als auch der UE-Typ und der V-Typ als Bausatz erhältlich, sodaß sich praktisch jeder den Shackman selber bauen und damit eine Menge Geld sparen kann (s. Elrad 1/82 u. Preisliste).

Zur Anwendung:

Die häufigste Anwendung des Shackman-ELS dürfte, neben der Realisation unserer Bauvorschläge, in dem Austausch der Mittelhochtoneinheiten in vorhandenen Boxen gegen den Shackman ELS liegen. Es kann festgestellt werden, daß die Verbesserung durch diese Maßnahme in allen Fällen nicht nur sofort hörbar war, sondern, und das ist das Entscheidende, dauerhaft zufriedenstellte.

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung des Shackman hat sich in England in der Erweiterung des oberen Frequenzbereiches beim alten QUAD erwiesen. Es kann gesagt werden, daß die Optimierung der QUAD Elektrostaten durch den Shackman prinzipbedingt die einzig harmonisch klingende Modifikation im Hochtobereich darstellt. Eine weitere Modifikation der alten Quad im unteren Frequenzbereich durch einen aktiv geregelten Subwoofer stellt eine Verbesserung dar, die unseres Wissens, sonst nicht, trotz Mark Levinson's Doppel Quad + Hartley, erreicht werden konnte.

Wer zwischen den Zeilen liest, kann in dem letzten Absatz eine Hommage an den Quad erkennen. Das ist richtig. Wir sind der Meinung, daß der alte Quad (über den neuen können wir noch nichts sagen) auf seine Art überragend ist und, da er nun mal in vielen Wohnzimmern steht, sollte für jeden die Möglichkeit bestehen, den Quad an den aktuellen Stand der Technik anzupassen.



Technische Daten der Shackman Elektrostaten

	UE - Typ MHT	T-Typ MHT	V-Typ MHT	T-Typ WR	V-Typ WR
Abmessungen	150 x 190x40	150 x 190x40	150 x 190 x 40	280x310x60	280x310x60
Empf. Verstärkerleistung	30 W - 100 W	integriert	integriert	integriert	integriert
Wirkungsgrad	91 b/W/m	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv
Übertragungsbereich	1 K - 18 K	1 K - 22 K	1 K - 22 K	500 - 20 K	500 - 20 K
Polarisationsspannung	1 KV	1,2 KV	1,2 KV	1,8 KV	1,8 KV
Elektrodenabstand	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,4 mm
Membrandicke	10 my	10 my	10 my	8 my	8my
Maximaler Schalldruck	105 dB	112 dB	112 dB	112 dB	112 dB
Art.-Nr.	45100	45101	45102	45104	45105

Das weitere Shackman Programm

Art. Nr.

45 106 ELS alleine, ohne Übertrager und Frequenzweiche

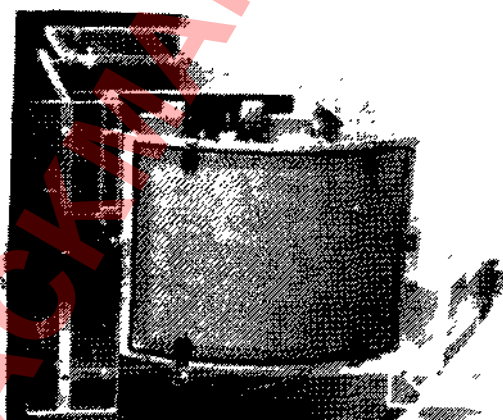
45 107 Bausatz der Transistorendstufe incl. aktiver Frequenzweiche und Platinen aus Elrad 1/82 + 12/81

45 108 Spezial-Trafo zu 45 107

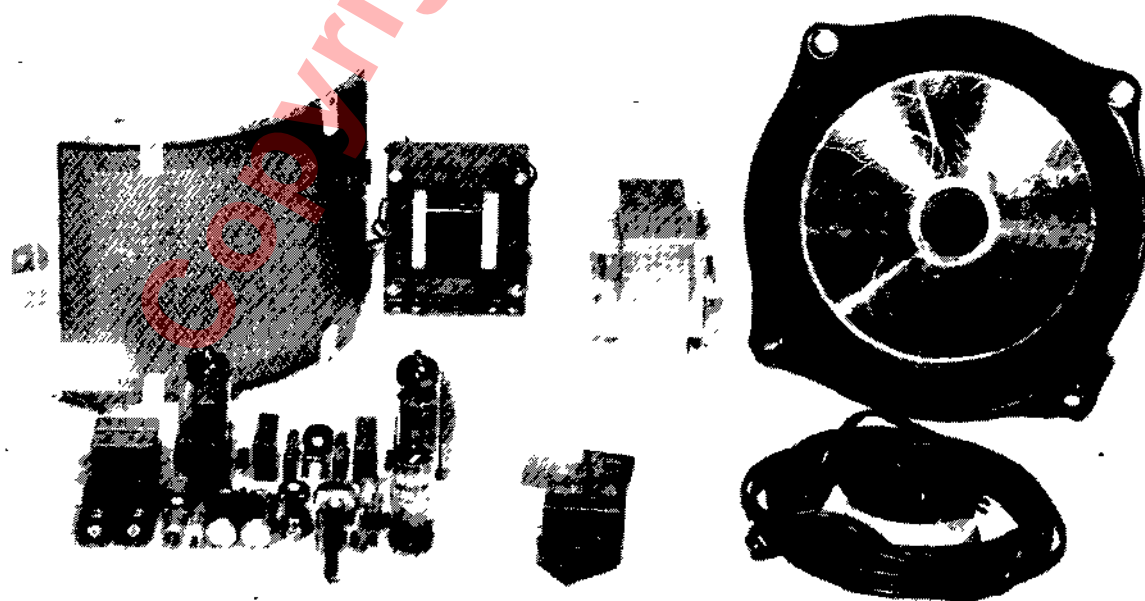
45 109 kompletter T-Typsatz mit:
45 106 + 45 107 + 45 108

45110 UE-TypalsKit

45111 V-Typ als Kit



Bauvorschläge für Shackman Elektrostaten



Röhrenendstufenbausatz für elektrostatische Lautsprecher Typ Shackman

Obwohl auch kleinere Elektrostaten prinzipiell alle Vorteile dieser Wandler besitzen, haben sich diese in der Vergangenheit kaum durchsetzen können. Der Grund dafür liegt in der problematischen Anpassung an vorhandene Verstärker. Jeder Elektrostat ähnelt im Aufbau einem Kondensator, daher die früher geläufige Bezeichnung als „Sprechender Kondensator“. Der Wechselspannungswiderstand eines Kondensators (Kondensatorimpedanz) nimmt zu hohen Frequenzen kontinuierlich ab. Ärgerlicherweise ist eine optimale Leistungsanpassung nur dann gegeben, wenn Generatorausgangs-impedanz und Verbrauchereingangsimpedanz übereinstimmen. Bei tieferen Frequenzen ist die Impedanz des ELS erheblich größer als die des Verstärkers, der Scheinleistungswirkungsgrad der Kombination wird schlechter. Selbst bei optimaler Anpassung am oberen Ende des Frequenzbandes arbeitet der Verstärker bei allen anderen Frequenzen an einer rein kapazitiven Last. Da zudem noch sehr hohe Tonfrequenzwechselspannungen in der Größenordnung mehrerer hundert Volt benötigt werden ist jeder normale Transistor mit dieser Aufgabe hoffnungslos überfordert.

Die mittlerweile erhältlichen Hochspannungstransistoren sind aufgrund ihrer mimosenhaften Empfindlichkeit völlig fehl am Platze. Ein Röhrenverstärker ist dagegen durch die angeschlossene Last ebenso wenig zu beeindrucken wie durch hohe Spannungen. Auch die Anpassung der hochohmigen Röhre an den hochohmigen Elektrostaten stellt kein Problem dar, eine solche Endstufe ist nach wie vor der ideale Anpassungsverstärker für jeden Elektrostaten und läßt die Vorteile dieses masselosen Wandlerprinzips erst voll zur Geltung kommen.

Bedient man sich zur Ansteuerung der Röhrenendstufe des bereits verstärkten Lautsprechersignals, so kann die Zahl der benötigten Verstärkerstufen und damit der Bauaufwand in Grenzen gehalten werden, der Aufbau eines solchen Verstärkers ist geradezu simpel. Durch einen regelbaren Vorwiderstand kann der Elektrostat im Schalldruck auch an Lautsprecher höheren Wirkungsgrades, deren dynamisches Verhalten (vgl. Podszus-Görlich) zur Kombination mit elektrostatischen Wandlern bestens geeignet ist, angepaßt werden. Da die Elektrostaten im Gegensatz zu Tauchspulenslautsprecherchassis nicht über Schwingspulen verfügen, ist eine aktive Pegelanpassung problemlos. Bei konventionellen Lautsprecherchassis führt die größte zugeführte Leistung, die ein Chassis bei aktiver Pegelanpassung verarbeiten muß, zu entsprechend größerer Erwärmung der Schwingspule, die dadurch ihren Ohmschen Widerstand ebenso vergrößert. Daraus resultiert eine fehlerhafte Wiedergabe, denn die Widerstandserhöhung senkt den Wiedergabepiegel der Chassis ebenso ab wie ein vorgeschalteter Widerstand. Bei der aktiven Anpassung zu großer Pegelunterschiede kommt es zu einer Dynamikkompression bestimmter Frequenzbereiche gegenüber anderen. Das Klangbild ist gestört.

Konstruktionsmerkmale

Um den Röhrenverstärker auch möglichst für Elektronik-Neulinge nachbaubar zu machen, waren folgende Punkte ausschlaggebend:

- Alle Bauteile sind auf einer gedruckten Schaltung untergebracht, um die bei den frei verdrahteten Schaltungen leicht möglichen Fehler oder Brummschleifen usw. vollkommen auszuschließen.
- Um den äußeren Verdrahtungsaufwand so gering wie möglich zu halten, sollten alle für den Betrieb erforderlichen Bauteile auf einem einzigen Print untergebracht sein, so daß lediglich der Lautsprecher eine Eingangsbuchse und der Trafo angeschlossen werden müssen.
- Der Abgleich der Schaltung ist so einfach, daß auch ohne geeignete Meßmittel der fehlerfreie Betrieb möglich wird.
- Die Spitzenspannung ist mit einfachsten Mitteln sichtbar gemacht und gewährleistet eine ständige Kontrolle des Aussteuerungszustandes des Verstärkers.

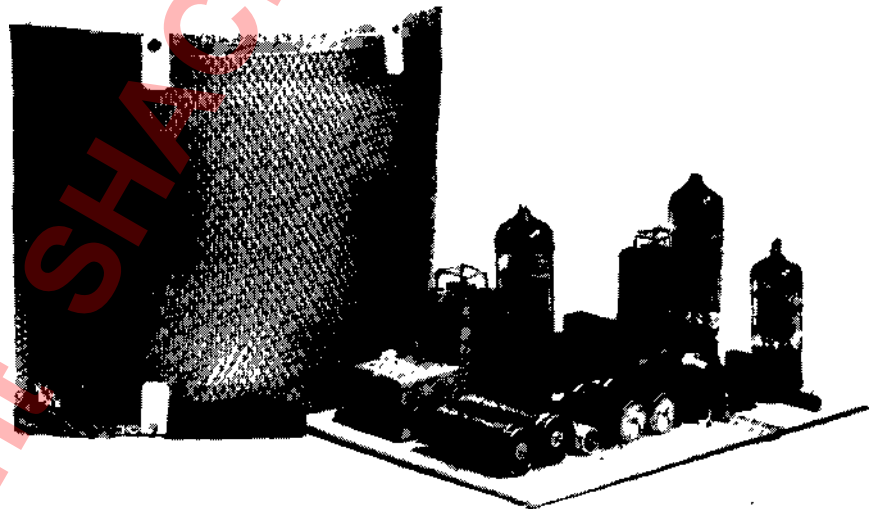
Verwendungsmöglichkeiten

Der hier beschriebene Verstärker ermöglicht den Einsatz des Shackman-Elektrostaten im aktiven Betrieb für Frequenzen ab 2 kHz. Auf dem Print ist eine 18 dB Weiche untergebracht, (C1, C2, L1, P1) die den Verstärker bei 2 kHz öffnet. Natürlich besteht die Möglichkeit, dem Verstärker eine aktive Weiche vorzuschalten.

Es ist jedoch in diesem Artikel verzichtet worden, ein „spezielles“ Filter hinzuzufügen. Für die, die sich dennoch für ein aktives Filter entscheiden, soll hier nur auf die Artikel in den Zeitschriften Elrad Ja. 1982 und Elrad Special 5 hingewiesen werden.

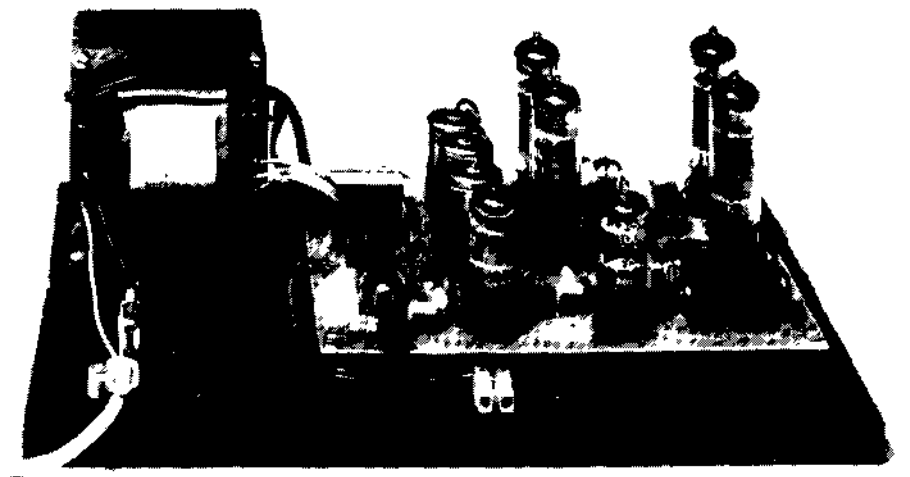
In beiden Zeitschriften sind aktive Weichen mit Print veröffentlicht worden, die vor die Röhrenendstufe geschaltet werden können.

Zu diesem Zweck ist dann allerdings die auf dem Verstärkerprint untergebrachte Weiche zu entfernen und das Poti P 1 im Widerstandswert entsprechend höher zu wählen.



Röhrenendstufe Typ MHT

Shackman „Constance Charge“ Elektrostat mit direktgekoppelter Röhrenendstufe.



Röhrenendstufe WR

Diese Röhrenendstufe ist eine Weiterentwicklung der bekannten Endstufe für Shackman Elektrostaten. Durch den größeren Bauaufwand und die höhere Leistung eignet sich diese Endstufe auch für größere Elektrostaten.

HARBETH COPOLYMERE POLYPROPYLEN LAUTSPRECHER

Copolymere Polypropylen-Lautsprecher Harbeth

Der Name des Entwicklers dieses Lautsprechers gehört zu den wohlklingendsten im gesamten Audiobereich, H. D. **Harwood** war 30 Jahre lang Leiter der BBC Entwicklungsabteilung. In dieser Zeit entwickelte er unter anderem alle BBC Monitore, die dann im Lizenzauftrag für die BBC von Rogers und Chartwell gefertigt wurden. Zudem erarbeitete er die BBC Kriterien für Abhörlautsprecher.

HARWOODS Philosophie ist einfach: Für einen Toningenieur ist es zweitrangig, ob ein Lautsprecher perfekte Meßergebnisse liefert; der Lautsprecher muß einfach richtig klingen.

Eine der Hauptfehlerquellen aller Lautsprecher ist die klangliche Verfärbung. Diese werden durch Resonanzen der Membran und Aufhängung verursacht. Jede dieser Fehlerquellen ist von Harwood im einzelnen untersucht worden und durch die jeweils optimale Methode abgestellt worden. Die Folge war ein komplett neu entwickeltes Tiefmitteltontonsystem.

Die herkömmlicher Papp-Papiermembranen waren hinsichtlich Klangqualität und Frequenzgang unbefriedigend. Erst der von HARWOOD erfundene BEXTRENE-Lautsprecher stellte einen ersten Schritt vorwärts dar. Leider benötigt jeder Bextrene eine zusätzlich von Hand aufgetragene Schicht Dämpfungsmaterial. Diese Schicht ist naturgemäß unregelmäßig und zudem relativ schwer und senkt somit beträchtlich die Empfindlichkeit. Trotz der Dämpfungsschicht blieb aber immer noch eine als „quäkend“ zu bezeichnende Verfärbung.

Aus weiteren Untersuchungen und Forschungen über thermoplastische Kunststoffe resultierte die neue **COPOLYMERE POLYPROPYLENMEMBRAN**, für die weltweit Patente angemeldet sind.

Der Vorteil gegenüber Bextrene liegt in dem erheblich höheren inneren Dämpfungsfaktor sowie in der Tatsache, daß kein weiteres Dämpfungsmaterial benutzt werden muß. Polypropylen ist deshalb erheblich sicherer herzustellen; zudem hat es eine geringere Masse und ist daher empfindlicher, sodaß ein kleinerer Verstärker benutzt werden kann.

Am wichtigsten ist jedoch die resultierende vollkommene Verfärbungsfreiheit. Dies kann verbal nicht ausgedrückt werden und muß daher anhand einer Hörprobe erhört werden.

Die Aufhängung der Membran ist genauso wichtig wie die Membran selbst. **HARWOOD** konnte nachweisen, daß verschiedene **Materialien**, die fast identische **Frequenzgänge** ergeben **völlig unterschiedlich klingen**. Er wählte daher einen Stoff, der **keine Klangverfärbungen** produziert, eine **tiefe Resonanzfrequenz** zuläßt und einen **linearen Frequenzverlauf** ergibt.

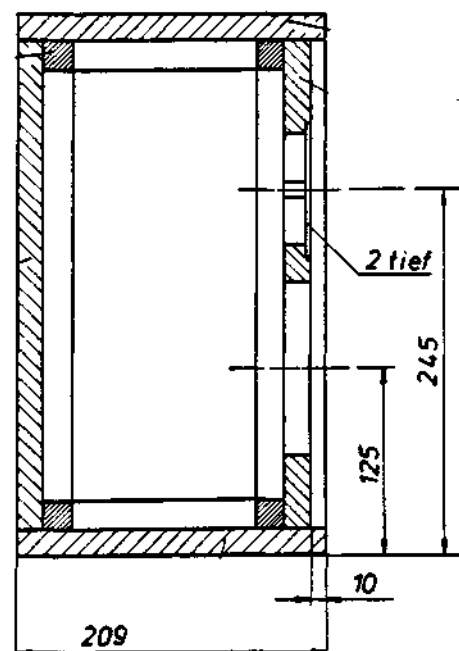
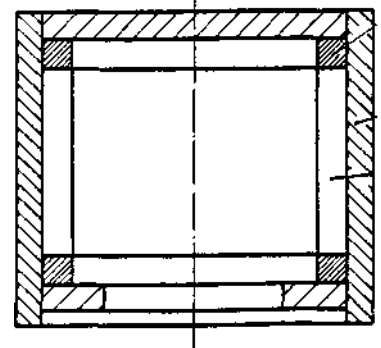
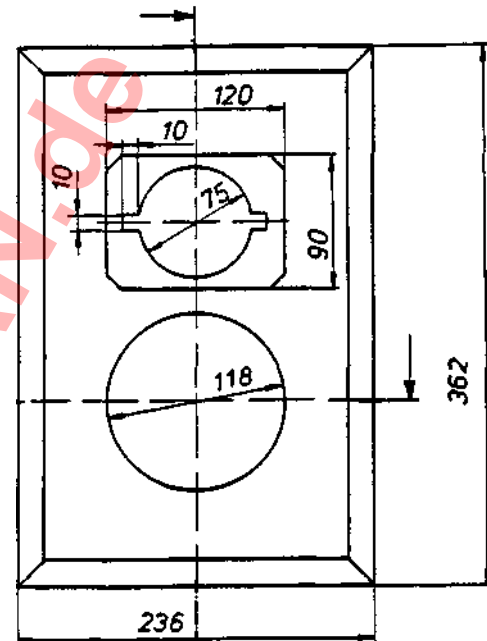
Außergewöhnlich ist auch die Konzeption der Weichen. Die Schaltungen gleichen den natürlichen Anstieg des Schalldrucks zu höheren Frequenzen hin aus und regulieren zudem den Impedanzverlauf. Der Hochtonteil der Weiche beinhaltet einen **AUTOTRANSFORMATOR**, mit Anzapfungen in 1/2 dB Schritten, um den Pegel von Baß und Hochtön in jeder Box genauestens anzupassen, sodaß immer zwei völlig gleich klingende Boxen gebaut werden können. Darüber hinaus sorgt sein Innenwiderstand von 0,05 Ohm für ein optimales Impulsverhalten des Hochtöners.

Die Serieninduktivitäten im Baß sind als Luftdrosseln ausgeführt, um Verzerrungen zu vermeiden. Der Autotrafo besteht aus eben diesem Grund aus Spezialsintern. Alle Kondensatoren sind bipolar und es werden keine Elektrolyte verwendet um den engen Toleranzvorgaben der Weiche genügen zu können.

Mit Hilfe dieser Weichen ist es möglich, die Harbeth Boxen Typ ML und Typ HL originalgetreu nachzubauen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Harwood eine Neuerung gelungen ist, die dem Lautsprecherbauer gestattet, relativ preiswert Lautsprecher mit absoluter Studioqualität zu bauen. Alle Bauteile sind selektiert und, was z. B. die Baßlautsprecher anbetrifft, nicht mit anderen Polypropylenlautsprechern dubiosen Ursprungs zu vergleichen. Beim Kauf von Harbeth-Lautsprechern sollte immer auf den original Ursprung Harbeth geachtet werden. Dieser ist z. B. erkenntlich durch einen speziellen Aufkleber. Für Lautsprecher die nicht originaler Herkunft sind, können wir keine Garantieleistungen übernehmen.

	LF8 MKIII	LF5 MKIII
Korbhöhe (mm)	86	80
Korbdurchmesser (mm)	218	130
Schallöffnung front (mm)	194	118
Schallöffnung rück (mm)	180	—
Magnetische Feldstärke (T)	1,12	1,0
Nennbelastbarkeit (W)	100	60
Impedanz β	8	8
Resonanzfrequenz (Hz)	25	50
Frequenzgang (Hz)	25-7K	45-9K
Wirkungsgrad 1 kHz (dB)	92	90
Membrangewicht (g)	7,5	5,5
Schwingspulen-		
durch-		
messer (mm)	25	25
Schwingspulen-		
induktivität (mH)	0,5	0,5
Art. Nr.	55100	55101



Harbeth ML-Bauplan



Halbling

Für alle Musikfreunde, die einen kleinen Lautsprecher suchen, aber auf eine gute Tiefbaßwiedergabe nicht verzichten wollen, gibt es eine neue R. A. E. Entwicklung. Den „Halbling“.

Der hervorragende Klang des Tiefmitteltontonsprechers ist das Ergebnis dreißigjähriger BBC-Forschung.

Dem Entwickler, Mr. Harwood, ist es gelungen, selbst kleinste Fehlerquellen zu beseitigen, die von anderen Lautsprecherherstellern, meist aus Kostengründen, nicht beachtet werden. Die Hochtontalotte bietet ein phantastisches Preis-Leistungs-Verhältnis, und wird auch von Mr. Harwood in seinen „Harbeth“ Lautsprecherboxen eingesetzt.

In einem geschlossenen Gehäuse ist die Tieftonwiedergabe eines 13 cm Lautsprechers leider nicht überzeugend, daher haben wir uns für eine etwas aufwendigere Gehäusebauart entschieden. Es handelt sich dabei um eine „Decoupled Acoustical Line“, eine Art Transmissionsline Gehäuse mit einer vorgesetzten Kammer. Bei dieser Gehäusebauart wird die Luftmasse in der Faltung nur bei tiefen Frequenzen in Bewegung versetzt.

Diese Bauart ermöglicht den Einsatz einer außerordentlich leichten Membran mit entsprechend gutem Impulsverhalten, wobei die mitschwingende Luft die bewegte Masse nur bei tiefen Frequenzen vergrößert. Diese Lösung ist nach unserem Ermessen weitaus besser als der Versuch, einen entsprechend schweren Tieftöner aus Gründen der Sparsamkeit als Mitteltöner zu mißbrauchen.

Eine Vorsichtsmaßregel ist allerdings angebracht, durch die Bauart reagiert dieser Lautsprecher sehr empfindlich auf Platterumpeln sowie andere tieffrequente Störungen.

Soweit der Verstärker über ein Subsonic-Filter verfügt, sollte dieser eingeschaltet werden.

Bitte, denken Sie daran, daß dieser Bausatz entwickelt wurde, um bei geringem finanziellem Aufwand eine möglichst naturgetreue Musikwiedergabe zu ermöglichen.

Die Reproduktion eines Schlagzeuges oder einer Kesselpauke in *Originallautstärke* können Sie von einem 13 cm Lautsprecher nicht erwarten. Durch den zusätzlichen Einsatz eines Subwoofers für die Frequenzen unter 100 Hz läßt sich der maximale Schalldruck über den ganzen hörbaren Frequenzbereich allerdings erheblich steigern.

ARNOR

Bei allen klanglichen Vorzügen sind dem 13 cm Harbethlautsprecher hinsichtlich der maximalen Lautstärke im Baßbereich doch bestimmte Grenzen gesetzt.

Durch den Einsatz eines weiteren Baßlautsprechers für den Bereich unter 150 Hz läßt sich der maximale Schalldruck über den ganzen Hörbereich vergrößern.

Gleichzeitig wird das Impulsverhalten des Harbethlautsprechers weiter verbessert, da dessen Membranauslenkung verringert wird.

Diese Kombination sollte immer dann eingesetzt werden, wenn der Harbeth LF 5 in größeren Räumen oder mit höheren Abhörlautstärken eingesetzt werden soll und ersetzt im R. A. E. Programm die TL 250.

Die Außenabmessungen sind mit denen der TL 250 identisch, die innere Faltung ist jedoch völlig anders (Art.-Nr. 118).

Ein nachträglicher Umbau ist leider nicht möglich.

Durch den Einsatz des kleineren Harbethlautsprechers mit geringerer bewegter Masse wird das ohnehin schon sehr gute Auflösungsvermögen der TL 250 noch weiter verbessert.

Gleichzeitig besteht die Möglichkeit die originale BBC Hochtontbestückung zu verwenden (Art.-Nr. 118).

Der verwendete Baßlautsprecher, der wegen der niedrigen Trennfrequenz keine Signale aus dem Mitteltonbereich mit verarbeiten muß, wurde von uns entsprechend modifiziert.

Die beschichtete Membran besitzt genügend bewegte „dynamische“ Masse, um einen sehr tiefen Baß trotz des recht kleinen Gehäuses zu ermöglichen, daneben vermindert die Beschichtung wirkungsvoll den Schalldurchgang durch das Membranmaterial.

Resonanzen, die aufgrund stehender Wellen im Gehäuse vorkommen, bleiben so unhörbar.

Im Baßbereich erfolgt die akustische Kopplung der Lautsprechermembran über eine exponentiell geöffnete Transmission Line Schallführung wie bei den Tuned Pipes, um das Impulsverhalten im Baßbereich zu optimieren.



Bauteile der ARNOR

Rhün

Anders als bei den elektrischen Komponenten einer HiFi-Anlage gibt es zwischen verschiedenen Lautsprechern noch immer erhebliche Klangunterschiede.

Ohne umfassende, tagelange Hörversuche ist es oft schwer zu beurteilen, welcher Lautsprecher natürlicher klingt.

Gerade sehr analytische Lautsprecher, die auch feinste Details auf Schallplatten hörbar machen, können nach längerer Zeit lästig klingen, wenn die Kombination der einzelnen Lautsprechersysteme und Frequenzweiche nicht optimal getroffen wurde.

Die Harbeth-Lautsprecher in Ihrem Bau-satz sind das Ergebnis 30-jähriger BBC-Forschung, und werden aufgrund ihrer Klangqualität in vielen Tonstudios als Abhörlautsprecher eingesetzt.

Die Bestückung im Mittel- und Hochtonbereich gewährleistet bestes Impulsverhalten und eine sehr gute Abstrahlcharakteristik, bei der auch die höchsten Frequenzen über einen großen Raumwinkel abgestrahlt werden (s. Kap. Superhochtöner).

Der Baßlautsprecher ist eine Eigenentwicklung der Firma R.A. E., dieses Lautsprechersystem ermöglicht eine sehr gute Tiefbaßwiedergabe trotz des relativ kleinen Gehäuses.

Auch bei der Entwicklung dieses Lautsprechers wurde besonderer Wert auf die Nachbausicherheit gelegt, was nützt der beste Lautsprecherbausatz, wenn zum Zusammenbau eine komplette Schreinerei nötig ist. Alle Holzteile, die zum Bau des Gehäuses nötig sind, bekommen Sie in jedem Baumarkt millimetergenau gesägt, sagen Sie ruhig, daß Sie ein Lautsprechergehäuse bauen und besonderen Wert auf genaues Einhalten der Maße legen.

Wenn Sie sich beim Zusammenbau an die Bauanleitung halten, ist der Zusammenbau des Gehäuses sehr einfach.

Beim Zusammenbau der Frequenzweiche sollte möglichst sorgfältig und genau nach der Zeichnung vorgegangen werden, da die Position der einzelnen Bauteile eingehalten werden muß.

Wird die Anordnung der Spulen geändert, kann es zu störenden Kopplungen dieser Bauteile kommen.

Beim Anschluß der Lautsprecher ist unbedingt auf richtige Polarität zu achten, die Pluspole der Lautsprecher sind rot markiert. **Die** Anschlüsse müssen mit den entsprechend bezeichneten Anschlüssen der Frequenzweiche verbunden werden.

Bei sorgfältigem Arbeiten dürften keine **Probleme** auftauchen. Nachdem alle Kabel angeschlossen sind, **muß** das Bodenbrett **luftdicht** in das Gehäuse eingeschraubt werden. (**Vorsicht, keine Kabel einklemmen!**)

Die Lautsprecher sind jetzt einsatzbereit, eine wichtige Frage ist allerdings noch offen.

Wo sollten die Lautsprecher aufgestellt werden?

Die freie Aufstellung eines Lautsprechers im Raum ist akustisch sehr günstig, im Baßbereich werden die Eigenresonanzen des Hörraumes nur in geringem Maß hörbar, gleichzeitig gibt es keine schallreflektierenden Flächen in unmittelbarer Nähe des Lautsprechers.

Reflexionen von Wänden, die dem Originalsignal in kurzem zeitlichem Abstand folgen, können die Stereoortung deutlich beeinflussen. Ihr Lautsprecher wurde für diese freie Aufstellung konzipiert. Nach Möglichkeit sollten die Lautsprechersysteme (Schallquellen) einen Abstand von mindestens 60 cm zur Rückwand und 1,2 m zur Seitenwand haben, ein größerer Abstand schadet in keinem Fall. Um das große Stereoaufhebungsvermögen dieses Lautsprechers wirklich genießen zu können ist es wichtig, genau in der Mitte vor dem Lautsprecher zu sitzen.

Auch wenn das aufgrund der Möblierung nicht immer realisierbar ist, sollten Sie zumindest in ruhigen Stunden einen bequemen Stuhl in diese Position bringen können.



Subwoofer sinnvoll oder hilflos?

Das DCS-System

Die Kombination von zwei kleinen Lautsprecherboxen mit einem Subwoofer ist nicht geeignet, die Physik zu überlisten. Das vorweg.

Der Anwendungsbereich eines Subwoofers ist, im Gegenteil, recht eng begrenzt.

Um bei tiefen Frequenzen hörbaren Schalldruck zu erzeugen, muß eine große Menge Luft bewegt werden. Um z. B. bei einer Frequenz von 20 Hz ein akustisches Watt zu erzeugen muß die Membran eines 30 cm Lautsprechers eine Amplitude von 5 cm ausführen (Olson, Harry, T. Acoustical Engineering, New York 1957, S. 135).

1 akustisches Watt ist die Leistung, die ein durchschnittlicher Lautsprecher bei einer Eingangsleistung von 100 Watt abgibt. Da kein 30 cm Lautsprecher über eine 5 cm lange Schwingspule verfügt, also diese Amplitude ausführen könnte, sind Subwoofer in geschlossenen Gehäusen (Acoustic Suspension) nur für geringe Schalldruckpegel geeignet, (ca. 0,1 akustisches Watt bei 20 Hz).

Da in diesem Fall das Lautsprecherchassis selbst die mechanischen Grenzen setzt, kann auch eine aktive Aussteuerung nicht helfen. Auch eine Gegenkopplung, die eine exakte Membranbewegung sicherstellen soll, ist nur wirksam, solange die Schwingspule des Lautsprechers noch im homogenen Magnetfeld ist, also bei recht geringen Schalldruckpegeln.

Das Baßreflexprinzip, durch das die nötige Membranamplitude im Bereich tiefer Frequenzen stark reduziert wird (s. Kapitel Baßreflex), erhöht die Leistungsfähigkeit eines Subwoofers erheblich.

Leider wird bei den tiefen Frequenzen, auf die das Gehäuse abgestimmt werden muß, entweder die Reflexöffnung zu klein (Pfeifgeräusche) oder der Tunnel sehr lang (zu großes Volumen nötig).

Bei Subwoofern sollten daher unbedingt Passivmembranen eingesetzt werden, nur so ist eine große strahlende Fläche ohne zusätzliches Volumen zu erzielen. Eine weitere Möglichkeit das Prinzip des Subwoofers zu optimieren bietet das Double Cavity System (DCS- Subwoofer), bei dem der Subwoofer aus zwei getrennten Kammern aufgebaut ist. Eine Kammer befindet sich hinter dem „aktiven Baßlautsprecher“, eine zweite zwischen diesem und der Passivmembran. Durch genaue Abstimmung der Kammervolumina läßt sich ein solcher Subwoofer für jeden Einsatzbereich optimieren. Dabei arbeiten die Kammern als akustische Frequenzweichen mit einer Flankensteilheit von 12 dB/Okt. Eine zusätzliche 6 dB Weiche genügt, um eine genügende Flankensteilheit von echten 18 dB/Okt. zu gewährleisten.

Obwohl dieser Subwoofer alle möglichen Vorteile nutzt, ist diese Bauart den Gesetzen der Physik unterworfen, je größer desto besser gilt auch hier und ein Nettovolumen von 100 l sollte als Minimum betrachtet werden.

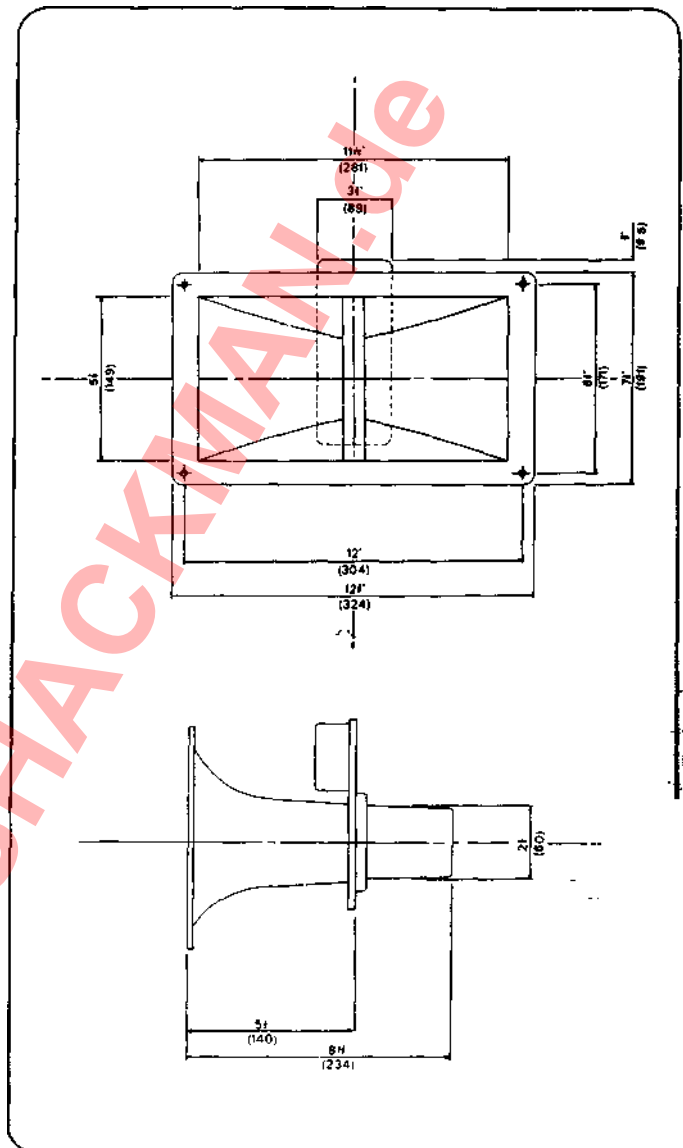
Bändchen- lautsprecher

Decca „London“ Ribbon Speaker

Neben den elektrostatischen Lautsprechern gibt es nur noch ein Prinzip, bei dem die Vorteile geringster bewegter Masse und direktgetriebener Membranen optimal genutzt wird. Bei den echten Bändchenhochtonern schwingt ein Bändchen aus Aluminiumfolie mit einer Masse von 5-10 Milligramm im Magnetfeld eines starken Permanentmagneten. Da auch bei diesem Prinzip die Membran gleichförmig angetrieben wird und die Masse praktisch vernachlässigbar ist, handelt es sich um ähnlich ideale Wandler wie sie die elektrostatischen Lautsprecher darstellen. Konstruktiv gibt es natürlich einige Unterschiede. Bei den Elektrostaten sind die Elektroden für die Signalspannung vor und hinter der Membran angebracht. Ohne einen kleinen Trick arbeitet ein solches System nicht linear, da die Kräfte des elektrostatischen Feldes im Quadrat zur Entfernung zu- und abnehmen. Erst ein geeigneter Vorwiderstand zwischen Polarisationsnetzteil und Membran bewirkt oberhalb einer wählbaren Frequenz eine konstante elektrische Ladung der Membran (Constant Charge Prinzip), da sich diese Ladung über den Vorwiderstand nicht schnell genug ändern kann. Ein solches System arbeitet auch bei größten Membranauslenkungen linear.

Ein solcher „Trick“ ist leider bei den Bändchenlautsprechern nicht möglich. Um Nichtlinearitäten zu vermeiden, müssen die Feldlinien parallel zum Bändchen verlaufen. Um dies zu erreichen, werden die Polplatten des Magneten seitlich am Bändchen angebracht. Diese Anordnung garantiert linearen Antrieb, begrenzt dafür jedoch die maximale Breite der Bändchenmembran, wenn der Aufwand für das Magnetsystem nicht in astronomische Dimensionen steigen soll. Die Membranen dieser Bändchenlautsprecher haben daher recht bescheidene Abmessungen und sind nur zur Wiedergabe höchster Frequenzen geeignet. Durch ein vorgesehtes Hörn läßt sich der Einsatzbereich zu tieferen Frequenzen erweitern. Je nach Größe des Hornsystems sind untere Grenzfrequenzen bis 1000 Hz realisierbar.

Einer der bekanntesten Bändchenlautsprecher ist das DECCA „London“ Ribbon Speaker, auch Kelly Bändchen genannt. Durch ein vorgesehtes Hörn mit den Abmessungen 32 x 19 cm wird eine untere Grenzfrequenz von 1000 Hz erzielt, damit ist der Einsatz in 2-Weg Kombinationen möglich. Die Probleme aufwendiger Frequenzweichen können so auf ein Minimum reduziert werden, mit einem geeigneten Mitteltiefenonchassis können Lautsprecherboxen mit außerordentlich realistischen Wiedergabeeigenschaften aufgebaut werden. Daneben eignet sich der Bändchenlautsprecher natürlich auch zur Optimierung bereits vorhandener Lautsprecherboxen.



Decca „London“ Ribbon Speaker:
Wirkungsgrad: 90 dB 1W IM
Bewegte Masse: 10 Milligramm
Impedanz: 8 Ohm
Frequenzbereich: 1000 Hz - 25 kHz

Zum Decca Bändchen ist jetzt eine direktgekoppelte Endstufe lieferbar, die das Bändchen ohne Übertrager direkt ansteuert. Dieser Verstärker ist auch zum Betrieb anderer echter Bändchen (Gamma, Jordanov) geeignet.



LOWTHER KORREKTUREN

Lowther Korrekturen

Ein bekannter englischer Boxenbauer äußerte einmal anlässlich eines Besuches in unserem Hause auf die Frage, was er von den Lowther-Chassis halte: „Lowther is the finest midrange unit in the world.“

Das bedeutet, daß das Lowther Chassis in dem Fall, wo es vom Hub der Tiefbässe, als auch von der Sensibilität der Höhen befreit wird, die relativ besten Ergebnisse bringt.

Dies können wir bestätigen, obwohl zu beklagen ist, daß es kein 13 cm oder 11 cm Lowther Chassis gibt; die Ergebnisse wären dann noch besser.

Da jedoch der Hauptvorteil des Lowther Chassis' in seinem idealen Verhalten in einem Baßhorn ist, kann es nicht sinnvoll sein, auf die Übertragung der tiefen Frequenzen zu verzichten. Um trotzdem eine ideale Wiedergabe zu erreichen, sind folgende Maßnahmen angezeigt:

- **Modifikationsstufe 1** Art. Nr. 44104
Erweiterung und Linearisierung des Frequenzganges durch Hinzufügen eines zusätzlichen Superhochtoners. Das Ergebnis ist eine luftigere und durchsichtiger Wiedergabe. Der Lautsprecher klingt räumlicher, feiner und weniger mittenbetont.
- **Modifikationsstufe 2** Art. Nr. 44105 f
Wie Stufe 1, jedoch ergibt eine zusätzliche Behandlung der Membran eine Linearisierung des Mitteltonbereichs. Klanglich fällt der Lautsprecher ausgewogener aus, nicht mehr nieselnd, er klingt natürlicher unter Beibehaltung des Impulsverhaltens im Tieftonbereich und in den Mitten.
Lieferzeit 3 Wochen.
- **Modifikationsstufe 3 A** Art. Nr. 44107
Hier wird dem Lowtherhorn ein Monosubbaß für die Frequenzen von 20 Hz bis 80 Hz zugeschaltet. Es handelt sich um einen geregelten Aktivbaß mit eingebautem Verstärker und elektronischer Frequenzweiche.
Obwohl die Lowther Hörner im Baßbereich durch trockene, explosionsartige Bässe beeindrucken, wird immer das Fundament vermißt. Durch die Modifikationsstufe 3 wird das Gesamtklangbild wuchtig, voluminös und tief herabreichend. Dem Problem, ein Subbaß käme in der Schnelligkeit mit dem Lowther Chassis nicht mit, ist durch die konsequente Anwendung neuester Erkenntnisse: '••••• geregelten Bässen entgegengetreten 'vorden, so daß ein rundes harmonisc' > Klangbild entstehen kann.
Lieferzeit t Wochen.

Modifikationsstufe 3 B Art. Nr. 44108
Als preiswerte Lösung des Tiefbassproblems bei Lowther können die DCS-Systeme eingesetzt werden. Siehe Kapitel DCS-Systeme

Nachträgliche Modifikationsstufe 2

Art. Nr. 44109
Für den, der bereits im Besitz von Lowther Chassis ist, gibt es die Möglichkeit über Einsendung der Lautsprecher in den Genuß der Modifikationsstufe 2 zu kommen. Das Chassis wird dann membranbehandelt und neu zentriert zurückgesendet, (incl. SH 26 u. FW-Kit)
Lieferzeit 2 Wochen

Wie sinnvoll die Modifikationen der Lowther Chassis sind, zeigt auch ein Artikel der französischen Fachzeitschrift „L'Audiophil“ in Nr. 26, Dezember 1982, S. 88 ff.

Zusammenfassende Auszüge:

„Der Frequenzverlauf des PM 6 ist recht seltsam, er ist nicht annähernd linear.

Auf einer Schallwand verläuft der Frequenzgang im Bereich von 100 - 1 kHz recht glatt. Dann ist aber bei 2,1 kHz eine ausgeprägte Resonanz festzustellen, die durch den Hochtonkegel und parasitäre Resonanzen zwischen Membran und Hochtonkegel entstehen. Zwischen 3 und 9 kHz steigt der Frequenzgang stetig an.

Ohne Berücksichtigung der erheblichen Peaks und Einbrüche kann die Frequenzkurve von 500 Hz - 10 kHz als kontinuierlich ansteigend bezeichnet werden, wobei der Gesamtunterschied 10 dB beträgt.

Ohne irgendwelche Veränderungsmaßnahmen klingt der PM 6 zu hell, jedoch nicht allzu unangenehm. Die mittleren Höhen klingen zu vordergründig. Schaltet man einen Hochtoner hinzu, wird sein unterer Frequenzanteil durch den Anstieg des PM 6 verdeckt. Paßt man nun den Pegel des Hochtoners an den PM 6 an, so werden die Höhen zu sehr betont und die Klangbalance verschiebt sich nach oben.

Der störende Peak bei 2,1 kHz kann beseitigt werden. Erst wird der Hochtonkegel verkleinert, sodann die Membran mit Plastikschaum behandelt. Diese Modifikation reduziert den Peak um 6-7 dB.

Im oberen Frequenzbereich wird durch eine Frequenzkorrektur der Frequenzverlauf begradigt.

So wird der PM 6 ein Lautsprecher, der sehr leicht mit den Mitteltonhörnern in Qualitätsboxen konkurrieren kann“.



Radial Mitteltonhörner

Die ZD-Serie

RADIAL Hörner

Die ZD-Serie

ZD Sandfilled

Auf der Suche nach geeigneten Hörnern für unsere wirkungsstarken Boxen, wie Hypexhorn, System Onken, Carlson Coupler etc. stellten wir fest, daß es Mitteltonhörner mit dem geforderten Cut-Off 300-500 Hz **und** mit High-Fidelity Qualität praktisch nicht gab oder aber **sündhaft teuer** waren.

Unseren klanglichen Vorstellungen am nächsten kamen lediglich Radial-Holzhörner mit hochwertigsten Treibern. Jedoch waren auch hier bei niedrigeren Frequenzen trotz Holz Materialschwingungen von Hand deutlich als Verfärbung hörbar.

Rundstrahlverhalten und Frequenzgang waren freilich vorzüglich. Was tun?

Wir entschlossen uns, ein eigenes Hörn zu bauen, das alle Vorteile auf sich vereinigt, aber deren Mängel vermied.

R. A. E. ZD Mitteltonhörner

Dieses Mitschwingen ist eine Folge der schlechten Dämpfungseigenschaften des verwendeten Vollholzmaterials. Bei allen optischen Vorzügen von Vollholz, akustisch gibt es bessere Lösungen. Ebenso wie bei Lautsprechergehäusen ist Spanplatte, als Beispiel, erheblich günstiger in den Dämpfungseigenschaften. Bedingt durch den hohen Schalldruck im Hörn werden an das Material natürlich andere Anforderungen gestellt als beim Bau von Tieftongehäusen. Handelsübliche Spanplatten scheiden daher nicht nur aus fertigungstechnischen Gründen aus. Das erfolgversprechende Prinzip der Spanplatte ist allerdings auch beim optimalen Material für Mitteltonhörner zu finden. Um eine ausreichende Druckfestigkeit zu erzielen und gleichzeitig beste Dämpfungseigenschaften zu erzielen, wird feiner Holzstaub mit einem speziellen Bindemittel eingesetzt. Durch die hohe Masse des Materials sind Resonanzen im Einsatzbereich des Horns ausgeschlossen. Das Bindemittel verringert wirkungsvoll die Komprimierbarkeit des Materials und damit Verluste am Hörn.

Diese Hörner arbeiten mit allen Vorteilen der Radial-Horn Geometrie, ohne die Nachteile der bisher verwendeten Materialien aufzuweisen. Resonanzen sind weder im Hochtonbereich feststellbar, diese verursachen in vielen Fällen den typisch aggressiven Klang von Metallhörnern, noch im Mitteltonbereich, der den Vollholz- und Kunststoffhörnern einige Probleme bereitet.

Das hervorragende Abstrahlverhalten und die Verzerrungsfreiheit dieser Mitteltonhörner empfiehlt die Kombination mit hochwertigsten Treibern und Hochtönern ähnlicher Abstrahlcharakteristik (Schlitzstrahler).



R. A. E. Mitteltonhorn ZD 150 HS

Technische Angaben zur ZD-Serie

Typ	ZD 150 H	ZD 150 HS	ZD 300 SF	ZD 300 H	ZD 300 HS	ZD 500 H	ZD 500 HS
Cut-Off	210 Hz	210 Hz	320 Hz	320 Hz	320 Hz	450 Hz	450 Hz
Empf. fx	300 Hz	300 Hz	420 Hz	420 Hz	420 Hz	600 Hz	600 Hz
Abstrahlwinkel	140°	140°	140°	140°	140°	140°	140°
Abmessungen	850 x 198 x 550		600 x 130 x 378		430 x 98 x 280		
Art. Nr.	11106	11107	11100	11101	11102	11104	11105

Zubehör zur ZD-Serie

Art. Nr. 11108	1" Adapter
Art. Nr. 11 109	Adapter 1" auf 2" Hörn
Art. Nr. 11 110	1" Schraubadapter

Die angegebenen technischen Daten geben die zulässigen untersten Grenzfrequenzen der jeweiligen Hörner an, es sollte immer bedacht werden, daß der Betrieb unterhalb dieser Frequenz die Belastbarkeit des verwendeten Treibers erheblich reduziert. Sparsamkeit rächt sich in solchen Fällen sehr häufig in Form zerstörter Treiber sowie horntypischen Verzerrungen. Bestehen Zweifel über die notwendige unterste Frequenz, sollte ein möglichst großes Hörn eingesetzt werden. Bei den ZD Hörnern ist dieser Sprung preiswerter als eine Ersatzmembran für den Treiber, bei mechanischer Überlastung ist darüber hinaus nicht jeder durchgebrannte Treiber reparabel, da Überreste der Membran im Luftspalt verschwinden und sich dort recht hartnäckig halten können.

Für höchste Leistung bei Frequenzen ab 300 Hz ist das ZD 150 wahlweise auch mit 2" Treiber verwendbar.

Im Hochtonbereich können alle ZD Treiber bis 8 kHz betrieben werden. Der Schalldruckabfall bei höheren Frequenzen kann bei manchen Treibern (z. B. JBL 2425) auch verstärkerseitig korrigiert werden, so daß auf einen Hochtoner verzichtet werden kann. Die Abstrahlcharakteristik ist dabei natürlich nicht so gut wie beim Einsatz eines Schlitzstrahlers, da die Hörner bei diesen Frequenzen einen kleineren Abstrahlwinkel aufweisen.

Die zur ZD Serie passenden Bauteile:

R. A. E. Life	Hypex Horn
System Onken	MFR Hörner
K-Horn	K-Würfel

alle übrigen Baueinheiten mit hohem und höchstem Wirkungsgrad

FOCAL T 120 FC

eine „andere“ Hochtonkalotte

Bereits kurz nach ihrem Erscheinen war diese Entwicklung von J. Mahul aufgrund der hervorragenden klanglichen Eigenschaften außerordentlich beliebt. Diese guten Klangeigenschaften sind das Ergebnis kompromißloser Entwicklungsarbeit, neuer Materialien und eines bisher unüblichen Konzepts bei der Abstimmung der Chassisparameter. Bereits die Montageplatte aus 5 mm starkem Kunststoff wirkt etwas eigenwillig, J. Mahul konnte bei Messungen an den normalerweise verwendeten Aluminiumplatten Vibrationen als Verzerrungsursache feststellen. Die Membran selbst besteht aus einem sehr leichten polystyrenverstärkten Gewebe und ist durch eine extrem weiche Sicke aus Latexschaum zentriert. Daraus resultiert die erfreulich niedrige Resonanzfrequenz von ca. 600 Hz, obwohl die gesamte Masse nur 0,25 g wiegt. Diese Kombination aus geringster bewegter Masse und geringster Federsteife der Aufhängung ist maßgeblich am guten Klang dieses Hochtonchassis beteiligt. Der Grund liegt in dem mechanischen Gütefaktor Q_m des schwingenden Systems, der sich aus der bewegten Masse, der Federsteife und dem Reibungswiderstand der Membranaufhängung zusammensetzt. Vergleichbare Kalotten besitzen zum Beispiel bei ähnlicher Fläche die doppelte bewegte Masse und die vierfache Federsteife. Da der Reibungswiderstand nicht beliebig gewählt werden kann, er beeinflusst den Wirkungsgrad, ergeben sich dabei Gütefaktoren von ca. 2,5 - 4,5 (bei der oben als Beispiel genannten Kalotte ca. 3,3). Erst durch den elektrischen Gütefaktor Q_e des Antriebs, der als Bremse wirksam werden kann, wird das Überschwingen des mechanischen Systems gebändigt. Als resultierende Gesamtgüte Q_e sind Werte von 0,9 - 1,3 üblich. Eine Gesamtgüte von 1,0 bedeutet bekanntlich, daß ein Lautsprecherchassis bis hinab zur Resonanzfrequenz annähernd gleichmäßig Schalldruck abgibt und nur geringe Überschwingneigung zeigt.

Was passiert, wenn diese elektrische Bremse ausfällt, ist allerdings leicht vorstellbar. Der verbleibende mechanische Gütefaktor von 3,3 bewirkt ein hoffnungsloses Überschwingen der Kalotte. Das dynamische (transiente) Verhalten des Chassis wird empfindlich gestört, da das Chassis statt auf neue Signale zu reagieren noch mit dem Ausschwingvorgang beschäftigt ist. Ein solcher Ausfall der elektrischen Bremse kommt leider sehr viel häufiger vor als allgemein angenommen wird. Die Wirksamkeit, mit der ein Magnetsystem Ausschwingvorgänge bremsen kann, ist von allen Widerständen in der Zuleitung abhängig. Solche Widerstände sind nicht nur die Kabel selbst, sondern weit wirkungsvoller, die Frequenzweiche im Sperrbereich und jeder Verstärker, der ein Signal abgibt. Frequenzweichen mit 12 und 24 dB Sperrwirkung sind dabei günstiger als solche mit 6 oder 18 dB, da bei den ersteren immer eine Spule parallel zum Chassis liegt, deren Widerstand zu tiefen Frequenzen (Resonanzfrequenz) hin abnimmt. Grundsätzlich kann

der Gütefaktor konventioneller Kalotten also im Betrieb zwischen 0,9 und 3,3 wechseln und das Chassis entsprechende Probleme mit der Wiedergabe des Musikprogramms bekommen.

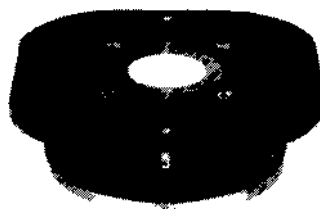
Bei der Focal Kalotte liegen die Dinge anders. Durch die geringe bewegte Masse und die niedrige Federsteife liegt bereits der mechanische Gütefaktor unter 0,9. Das Ausschwingverhalten dieses Chassis ist bereits ohne elektrische Bedämpfung besser als das der Vergleichskalotte im günstigsten Fall mit elektrischer Bedämpfung. Bei optimaler Bedämpfung liegt die Gesamtgüte bei 0,5 womit jedes Überschwingen ausgeschlossen ist.

Durch dieses jederzeit kontrollierte Ausschwingverhalten hat diese Kalotte im Betrieb große Ähnlichkeit mit einem guten Hornlautsprecher, bei dem ein Überschwingen der Membran bekanntlich durch den hohen Strahlungswiderstand der Hornöffnung vermieden wird. Neben dieser interessanten Dimensionierung der Chassisparameter sorgt der 750 Gramm schwere Magnet aus spezieller Eisen-Kobalt Legierung mit Flußdichten bis zu 2,05 Tesla für den überzeugenden Wirkungsgrad von 95 dB/W/m. Ein weiteres Konstruktionsmerkmal ist die nach innen gewölbte Kalotte, die eine Reihe von Vorteilen bietet. Die Kombination einer 30 mm Kalotte mit einer 20 mm Schwingspule erlaubt es den Schwingspulenträger aus Aluminium zur Versteifung der Kalotte zu nutzen, gleichzeitig ist das Abstrahlverhalten einer solchen Kalotte bei hohen Frequenzen besser als das der nach außen gewölbten Exemplare.

Aus der elektrischen Überdämpfung des Chassis resultieren einige Eigenarten, die, bei der Verwendung dieser Kalotte, beachtet werden sollte. Der Schalldruckfrequenzgang ist erst ab der Anpassungsfrequenz linear. Diese liegt für eine 30 mm Kalotte bei ca. 3.600 Hz. Bei tiefen Frequenzen reduziert der Antrieb die Membranamplitude kontinuierlich, dieses Chassis ist damit für den Betrieb an 6 dB Weichen geeignet. Eine 12 dB Weiche erhöht allerdings die Belastbarkeit erheblich (von 25 auf 75 Watt) und bietet, wie erwähnt, weitere Vorteile.

Wie auch die zahlreichen Hörerfahrungen mit diesem Chassis beweisen, ist J. Mahul mit den Focal T 120 FC und T 120 auf dem besten Weg, alle klanglich störenden Eigenarten des Kalottenprinzips zu eliminieren.

Selbstverständlich werden diese Hochtonchassis auch in allen R. A. E. Lautsprecherboxen mit „Podszus-Görlich“ Chassis alternativ zu elektrostatischen Systemen angeboten.



FOCAL Lautsprecherkits

auch Jaques Mahul, der Entwickler der „Focal“ Lautsprecherchassis und Lautsprecherboxen ist als Autor und Herausgeber des französischen Insider Magazins L'Audiophile, kein Unbekannter in der Lautsprecherszene. Ebenso wie die „Harbeth“ Lautsprecherchassis, zeichnen sich auch die „Focal“ Chassis eher durch konsequente Fehlersuche und Weiterentwicklung als durch revolutionäre Ideen und deren selten überzeugende Folgen aus.

Wie überzeugend dagegen die gezielte Weiterentwicklung unter Einbeziehung neuester Erkenntnisse und Materialien sein kann, wird besonders in der „Focal“ T 120 FC Hochtonkalotte deutlich. Dieses Chassis wird daher an anderer Stelle ausführlicher beschrieben.

Bei den Mitteltiefensystemen von „Focal“ führt die Weiterentwicklung im wesentlichen zu einem neuen Membranmaterial, Neoflex. Diese Kunststoffmembranen sind, ähnlich den Polypropylenmembranen der „Harbeth“ Chassis, bei gleicher innerer Dämpfung erheblich leichter als die älteren Bextrene beschichteten Membranen. Bei richtiger Wahl der Membrangeometrie und Materialstärke lassen sich mit diesen neuen Materialien Membranen mit hervorragendem Schallfrequenzverlauf ohne ausgeprägte Peaks auch außerhalb des Einsatzbereiches herstellen. Zusammen mit der ausgeglichenen Abstrahlcharakteristik arbeiten diese Membranen weitestgehend verfärbungsfrei. Das geringe Gewicht dieser Membranen erleichtert dabei einen kleinen Kunstgriff. Ohne das Impulsverhalten des Chassis störend zu beeinflussen, kann eine weitere Schwingspule in das Chassis eingebaut werden. Diese zweite Schwingspule wird dabei im Baßbereich über die Frequenzweiche mit in Betrieb gesetzt, die Anschlußimpedanz des Chassis wird dadurch halbiert. Durch den geringen Widerstand gibt der Verstärker in diesem Frequenzbereich entsprechend mehr Leistung ab, das Chassis kann diese höhere elektrische Leistung in mehr akustische Leistung umwandeln. Theoretisch kann damit bei vorgegebenem Wirkungsgrad sowohl die untere Grenzfrequenz erniedrigt und das nötige Gehäusevolumen verringert werden. Theoretisch bedeutet dabei, daß es nicht ganz so einfach ist wie es klingt. Kleine Lautsprecherchassis mit Membrandurchmessern von 13 bis 17 cm können durch die geringe Membranfläche und den begrenzten maximalen Hub nur geringe Schallpegel im Baßbereich erzeugen. Erst durch den Einsatz eines korrekt abgestimmten Baßreflexgehäuses kann auch ein kleines Lautsprecherchassis erstaunliches leisten. Bei dieser Abstimmung zeigt sich die Erfahrung des Entwicklers sehr deutlich, optimale Belastbarkeit beim Betrieb mit Musikprogramm ist gerade bei kleinen Lautsprecherboxen nur bei fundierter Kenntnis und Kontrolle aller Designparameter zu realisieren. Die vorgestellten Bauvorschlüsse müssen daher auch hinsichtlich der Gehäuse so genau wie möglich nachgebaut werden. Selbst geringe Abweichungen können die Belastbarkeit dieser Kombinationen deutlich verringern.

Alle zitierten Arbeiten sind unter www.SHACKMAN.de erhältlich

Wer sich dagegen an die Bauanleitung hält, kann bereits mit der kleinsten „Focal“ Kombination eine Lautsprecherbox aufbauen, von der „Hobby“ Magazin im Selbstbau-Lautsprechertest (Heft 19/20 1983) schreibt: Sehr natürliche, detailtreue Wiedergabe, durchsichtiger transparenter Klang, extrem saubere Bässe, sehr genaue Ortung der einzelnen Stimmen und Instrumente. Diese Beurteilung stimmt mit unseren Erfahrungen klar überein. Die hervorragende Auflösung im Mittel- und Hochtonbereich ist natürlich auch der „Audax“ HD 12x9 D 25 Hochtonkalotte zu verdanken. Der gleiche Typ wird übrigens auch von Mr. Harwood in den HL und ML Monitorboxen eingesetzt. Hier herrscht offensichtlich einmal Einigkeit unter professionellen Entwicklern.

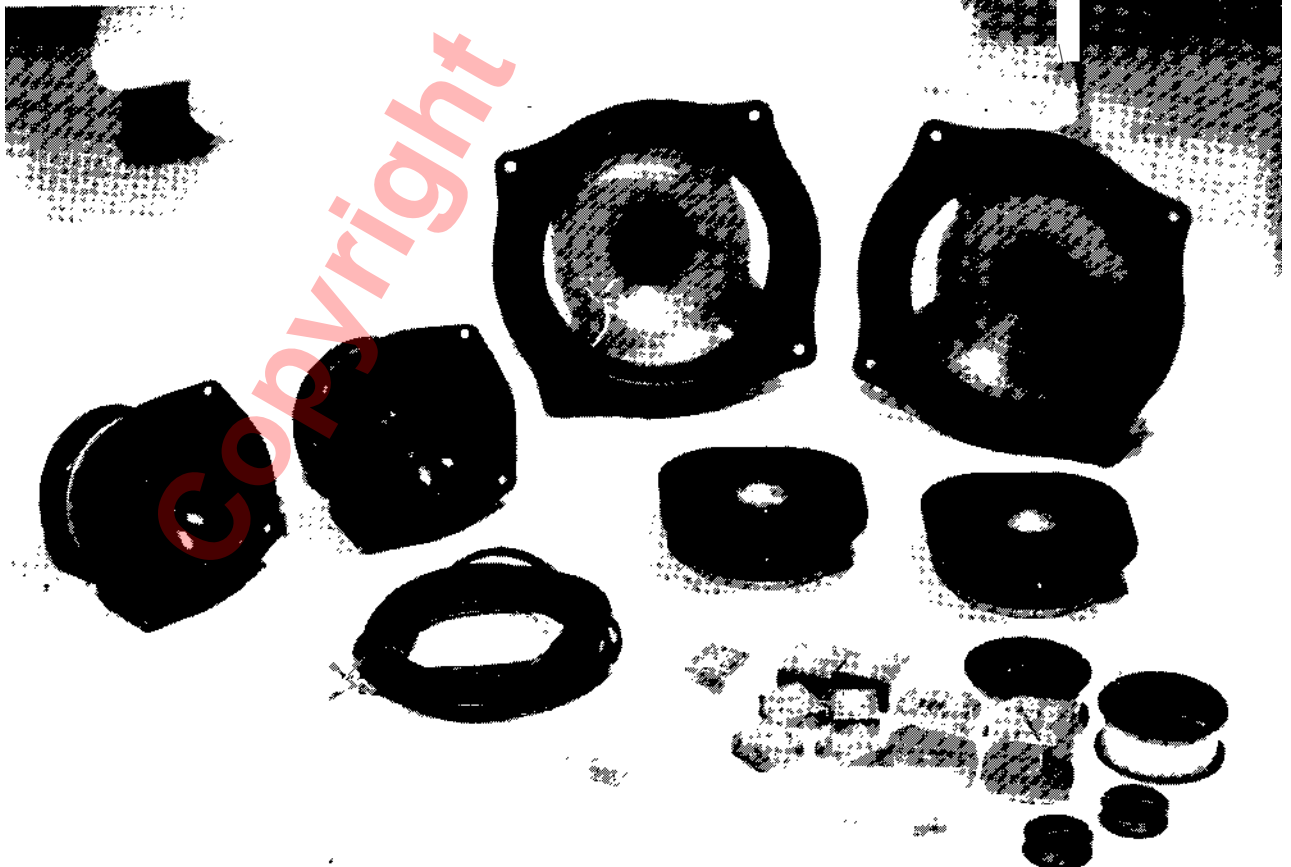
Neben dieser Regalbox gibt es noch zwei weitere Focal-Kits mit der Doppelspulentchnik, die nicht übersehen werden sollten. Der Kit 285 DB ist ebenfalls eine Regalbox mit einem 17 cm Chassis und der bewährten Audax Kalotte. Der Kit 300 DB ist eine 40 l Standbox mit einem 20 cm Chassis im Mitteltiefenbereich und der bekannten Focal T 120 Kalotte.

Focal TL 408 als Bausatz, eine Transmission-Line Box von Jaques Mahul.



Diese Hochtonkalotte markiert, wie an anderer Stelle beschrieben, einen neuen Grad der Technik. Mit dem Kit 300 DB ist die sinnvolle Grenze der Doppelspulentchnik erreicht, für höhere Ansprüche bietet J. Mahul mit dem Kit 350 eine Dreibege-Box mit vier Lautsprecherchassis nach dem Innentreiberprinzip an. Im Hochtonbereich wird die T 120 Kalotte eingesetzt, die Wiedergabe des Mitteltonbereiches übernimmt ein 13 cm Focal Chassis mit Neoflex-Membran. Der 20 cm Tieftöner, ebenfalls mit Neoflex-Membran, wird dabei im Tiefbaßbereich von einem weiteren 20 cm Chassis unterstützt. Durch das bekannte Innentreiberprinzip wird auch bei dieser Kombination eine ungemein saubere und tiefe Baßwiedergabe erzielt. Der Mitteltonbereich zeichnet sich aufgrund des zusätzlichen Mitteltonchassis durch weiter gesteigerte Auflösung und Detailtreue aus.

Da „Focal“ zur Zeit keine Kombination mit einem 13 cm Tiefmitteltonchassis und der T 120 Kalotte anbietet, haben wir zusätzlich noch eine solche Kombination entwickelt. Dabei wird das weniger bekannte 5 N 402 DB Chassis eingesetzt, dieses Chassis wurde aus dem Mitteltonchassis 5 N 302 entwickelt und harmonisiert mit der Hochtonkalotte hervorragend. Diese Kombination kann wahlweise mit einer geschlossenen Box und einem angepaßten DCS Subwoofer, einem Baßreflexgehäuse für den Betrieb ohne Subwoofer oder einem Daline (Decoupled acoustical Line) Gehäuse aufgebaut werden. Dieses Gehäuse bietet gegenüber dem Baßreflexgehäuse bei größerem Volumen eine tiefere untere Grenzfrequenz.

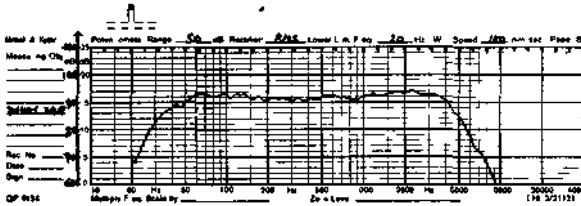


**8 N
401-DBE**



NEOFLEX

200 mm - 8"



**7 N
401-DBE**



NEOFLEX

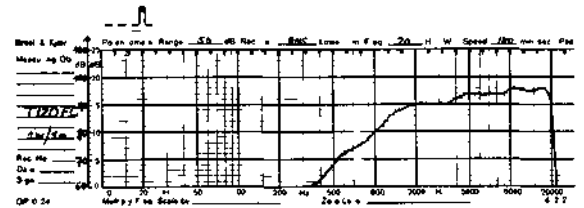
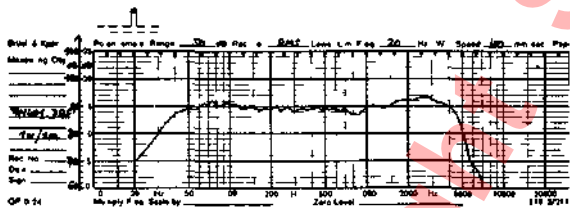
175 mm - 7"

T 120 FC



Ferro-cobalt
Iron-cobalt

(120x 120 mm)



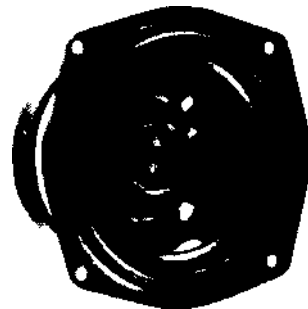
**5 N
401-DB**



NEOFLEX

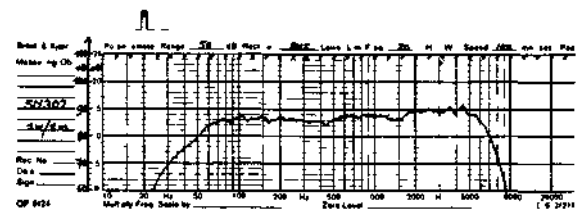
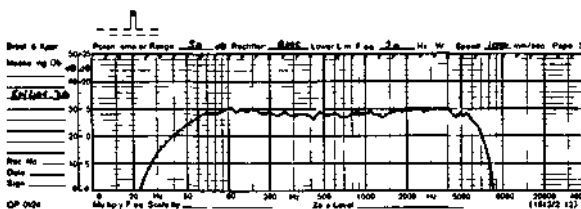
130 mm - 5"

5 N 302



NEOFLEX

130 mm - 5"



Lautsprecherchassis von MB Elektronik

Der Chassishersteller MB Elektronik aus Obrigheim war in der Vergangenheit nur wenigen Insidern bekannt, obwohl MB Chassis seit langem in fast allen deutschen Fertigboxen eingesetzt werden. Besonders die Supronylkalotten fanden aufgrund der vielgeübten klanglichen Eigenschaften einige Beachtung auf dem Fertigboxenmarkt.

Mit einer Neuentwicklung, den „Metall Compound Dome“ Chassis hat MB Elektronik jetzt auch als Hersteller von Fertigboxen für einiges Aufsehen gesorgt. Es

handelt sich dabei um Kalotten für den Mittel- und Hochtonbereich bei denen die Membran und der Schwingspulenträger aus einem Stück Titan gefertigt werden. Nach den Angaben der Entwickler ist damit bestes Impulsverhalten, hoher Wirkungsgrad und hohe Belastbarkeit realisierbar. Die kritischen Klebestellen zwischen Membran und Spuleträger entfallen und Titan ist, anders als einige Kunststoffe und Papier extrem robust und alterungsbeständig. Aus diesem Grund setzt übrigens auch die amerikanische Firma JBL seit einiger Zeit Titan

als Membranmaterial für Treiber von Mitteltonhornlautsprechern ein.

Diese MCD Chassis werden ab etwa Juli 84 auf dem Selbstbaumarkt angeboten. Da wir zur Zeit noch nicht über technische Daten verfügen, können wir leider noch nichts Konkretes veröffentlichen, ab Juli wird ein entsprechendes Datenblatt mit Kombinationsvorschlägen verfügbar sein.

Die Sypronyl-(Superpolyamid) Kalotten sind bereits lieferbar, die technischen Daten sind in der Tabelle zusammengefaßt.



»ENDLICH« DAS „ORIGINAL“ Bei R.A.E. ALS BAUSATZ Electro Voice SENTRY

„Sentry III“ - schon jetzt eine Legende im Lautsprecherbau und der Traum vieler Musikfans. Jetzt zu realisieren durch den preiswerten Selbstbausatz mit allen Originalteilen, d. h. mit dem Original Baßchassis und der Original-Frequenzweiche. Gerade für die Realisierung der vollkommenen Digital-Aufnahme und Wiedergabetechnik ist dieser Studiomonitor bestens geeignet. Schon geringe Verstärkerleistungen reichen aus, um die volle Dynamik eines Live-Konzerts im Wohnraum wiederzugeben.

Auszug aus einem Testbericht: Saubere Großbox extrem hohen Wirkungsgrades, die Dank ihrer gewaltigen Dynamik, ihres

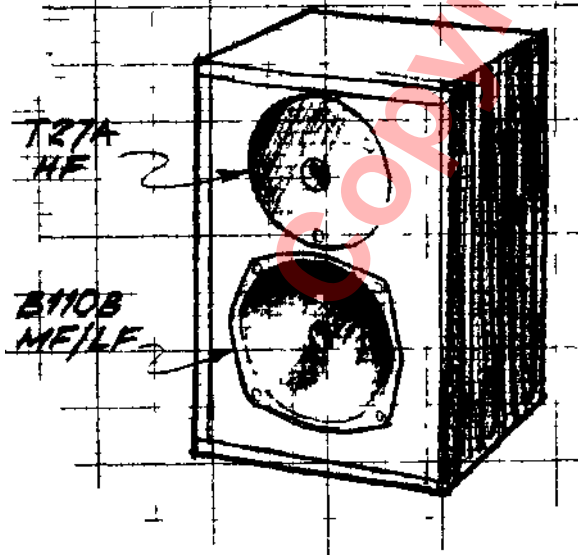
idealen Rundstrahlverhaltens und ihrer weitgehenden Klangneutralität ein Klangbild bewundernswerter Transparenz erzeugt und deshalb eine Spitzenposition in der Klasse der Giganten übernimmt. (Hifi Stereophonie 1975) Quelle: Elektro-Voice Information.

Im Jahre 1983 beurteilte das „Hobby-Magazin“ im großen Lautsprechertest in Heft 19 und 20 diese Lautsprecherbox so: Sehr gute Auflösung, sehr gute Durchzeichnung, springt gut an, knackige, harte Bässe, Mitten und Höhen aber nieselnd verfärbt. Ideal für Popmusik.

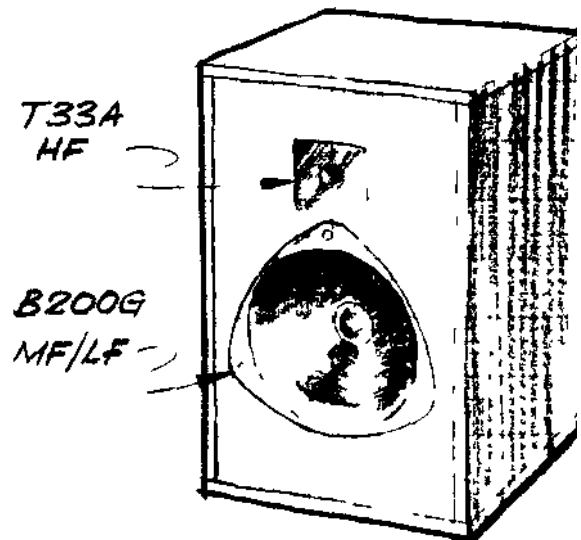
K.E.F. Constructor Series CS 5



Enclosure 12mm high density chipboard - glue & screw
Vol. approx 8 litres



Enclosure 15mm high density chipboard - glue & screw
Vol. approx. 22 litres²





Lautsprecherelbstbau am Beispiel der KEF CS 7

Die berechtigte Frage, wie kompliziert der Selbstbau einer Lautsprecherbox sein muß, um beste Ergebnisse zu erzielen kann am Beispiel der KEF CS 7 sehr leicht beantwortet werden. Diese Kombination ist der größte Kit der von KEF speziell für den Selbstbau entwickelten CS-Serie. Obwohl es eine echte Drei-Wege Box ist, sind für den Aufbau keinerlei Vorkenntnisse notwendig.

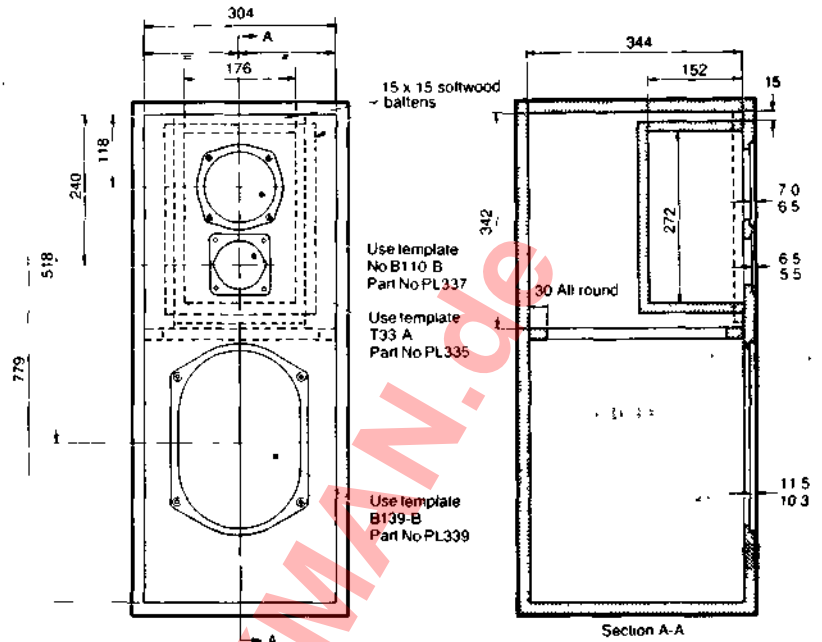
Das geschlossene Gehäuse ist, ebenso wie das Mitteltongehäuse, aus rechteckigen Holzplatten ohne Winkel- und Gehrungsschnitte aufgebaut. Diese Platten sind preiswert in jedem Baumarkt erhältlich. (Ein kleiner Tip, je neuer der Baumarkt ist, um so besser ist meist die Sage, mit der dort gearbeitet wird.) Zum Zusammenbau wird lediglich eine Stichsäge und ein Lötkolben benötigt, weitere Spezialwerkzeuge sind nicht erforderlich.

Beim Zusammenbau helfen einige Stiftnägeln zum Fixieren der Teile und einige Vierkantleisten. Es sollte sorgfältig gearbeitet werden, damit alle Verbindungen luftdicht sind. Nachdem das Gehäuse aufgebaut ist, muß es bedämpft werden. Hier kann man nichts falsch machen, das gesamte Volumen, auch die Mitteltonkammer, wird lose mit dem Dammaterial aufgefüllt.

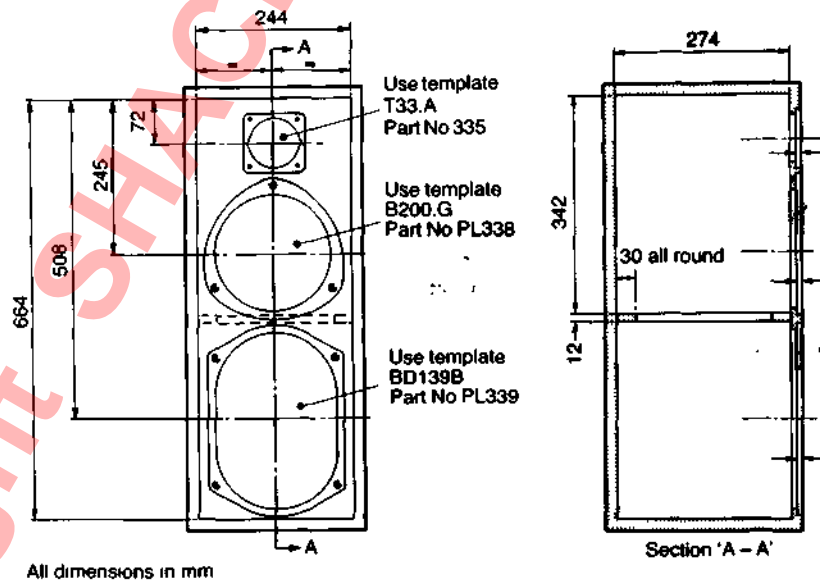
Noch ein kleiner Hinweis! Grundsätzlich kann die Form des Gehäuses abgeändert werden. Eine Pyramidenform hat sich zum Beispiel sehr oft bewährt, rechteckige Gehäuse mit parallelen Wänden haben allerdings immer Einfluß auf den Klang einer Box. Das vorgestellte Gehäuse ist das Ergebnis langer Berechnungen und Versuche und minimiert diese Einflüsse, andere rechteckige Gehäuse werden nicht so gute Ergebnisse bringen.

Der Einbau der Chassis und der Anschluß der Frequenzweiche sollten keine Probleme aufwerfen, alle Anschlußpunkte sind genau markiert und den Chassis liegen Schablonen für die Ausschnitte sowie Dichtstreifen bei.

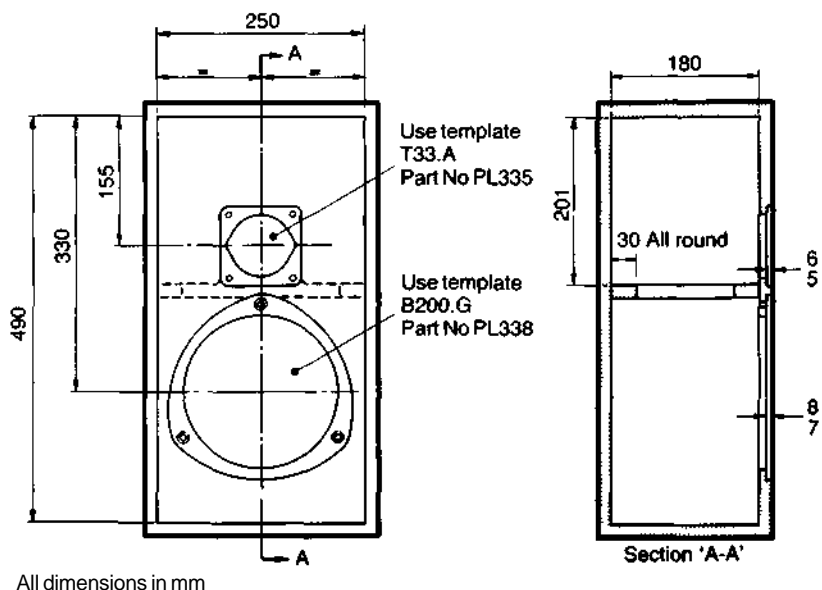
Und was ist nun der Lohn für die Selbstbaumühe? „Natürlich, gute Durchzeichnung und Auflösung, Stimmenwiedergabe sehr schön. Sehr genaue Ortung aller Stimmen und Instrumente. Tolle Baßwiedergabe mit straffen und sauberen Tiefbässen.“ So urteilt das „Hobby“ Magazin im großen Selbstbauboxen Test (Heft 19/20, 1983) über die KEF CS 7. Die Entwicklung eines solchen Bausatzes erfordert größte Erfahrung und beste Meßgeräte. KEF hat beides. Sie können es nutzen.



KEF Lautsprecherbox CS 7



KEF Lautsprecherbox CS 5



KEF Lautsprecherbox CS 3

INTELLIGENZ STATT DICKER MAGNETE

Der Magnet ist der Motor des Lautsprechers. Wie beim Automotor ist nicht die äußere Größe wichtig, sondern die Leistung. Das DYNAUDIO CENTER-MAGNET-SYSTEM erreicht bei gleicher Magnetgröße eine Wirkungsgradsteigerung von mehr als 100%. Wertvolles Magnetmaterial wird gespart - die Leistung steigt trotzdem. Das merken Sie auch an den günstigen Anschaffungskosten. Intelligenz zahlt sich eben aus. Auch dieses geniale, einfach herzustellende Magnetsystem wird in Handarbeit an Präzisionsdrehbänken zu hörbarer Präzision geformt. übrigens hat der 17W-75 noch andere intelligente Besonderheiten:

- PHA-Polymerkunststoffmembrane aus einem Stück geformt
- belüftetes Magnetsystem
- 75-mm-Schwingspule
- 45µs Steigzeit
- Hexacoil

DYNAUDIO Lautsprecherkombinationen

Die Philosophie der danischen Lautsprecherspezialisten Dynaudio durfte wohl mittlerweile jedem Lautsprecherinteressierten gut bekannt sein. Durch den Einsatz vieler Lautsprecherchassis, von denen jedes speziell für einen schmalen Frequenzbereich optimiert wurde, soll in Verbindung mit Frequenzweichen geringer Sperrwirkung eine möglichst realistische Wiedergabe des Musikprogramms erzielt werden. Das Hobby Magazin schreibt im Selbstbau-Lautsprecher Test (Heft 19/20 1983) über die Dynaudio Kombination DAK 4/210 folgendes: Tiefbaß en masse, sehr gute Höhenwiedergabe und Auflösung, detailreiches Klangbild natürlich, sehr genaue Ortung.

Ganz offensichtlich ist diese Philosophie erfolgreich und rechtfertigt den Aufwand einer Vierwegbox. Wem dieser Aufwand noch nicht ausreichend erscheint, kann mittlerweile eine Box mit sechs Dynaudio Chassis nach dem Innentreiberprinzip aufbauen, mit ca. 170 l Volumen eine recht stattliche Erscheinung. Hier zeigt sich die logische Konsequenz der Dynaudio Philosophie, je mehr verschiedene Chassis zum Einsatz kommen, um so besser wird das klangliche Ergebnis ausfallen.

Umgekehrt zeigen sich allerdings die Grenzen der hochspezialisierten Chassis, beim Einsatz in Zweiweg-Kombinationen und zum Teil auch bei Dreiweg-Kombinationen. Gibt es sowohl unter klanglichen Aspekten als auch hinsichtlich der Belastbarkeit überlegene Lautsprecherkombinationen (vgl. Sie dazu bitte auch das Kapitel Subjektive Klangbeschreibungen).

Diese Lautsprecherbox mit Innentreiber sollte dabei keineswegs mit einem Dynaudio Compound-System verwechselt werden. Eine derartige Lautsprecherbox ist mit konventionellen Chassis nicht umzubauen. Um in diesem Punkt hinreichend Klarheit zu schaffen, haben wir W. Ehrenholz, Geschäftsführer des deutschen Dynaudio Vertriebes, um eine Stellungnahme gebeten.

Sehr geehrter Herr Roemer,
betr. Stellungnahme Compoundsystem

Das Compoundsystem ist eine ideale Möglichkeit, die Baßresonanz völlig zu kontrollieren und somit der Impedanz einen idealen Verlauf zu geben.



DYNAUDIO Pandora

Ein völlig resonanzfreier Tiefbaß mit ungewöhnlicher Dynamik läßt sich so mit relativ kleinen Membrandurchmessern und Gehäuseproportionen verwirklichen.

Die technischen Schritte, die wir dazu unternehmen, haben nichts mit dem einfachen Anordnen von zwei hintereinander geschalteten Baßtreibern zu tun (Doppelbaß-System), wie es von einigen anderen Herstellern praktiziert wird. Auf diese Weise erhält man nur fast zufällige Ergebnisse.

Bei uns wird das Ergebnis durch konstruktive Maßnahmen bestimmt. Eine Vielzahl von Parametern müssen berücksichtigt werden. Wie Volumenverhältnisse und Membranflächen, elektrische und akustische Dämpfung von Baßlautsprecher und Treiber, Membranmassen, Schwingspulen, Wickelbreiten, Impedanzen, Compliance und Schnelligkeit.

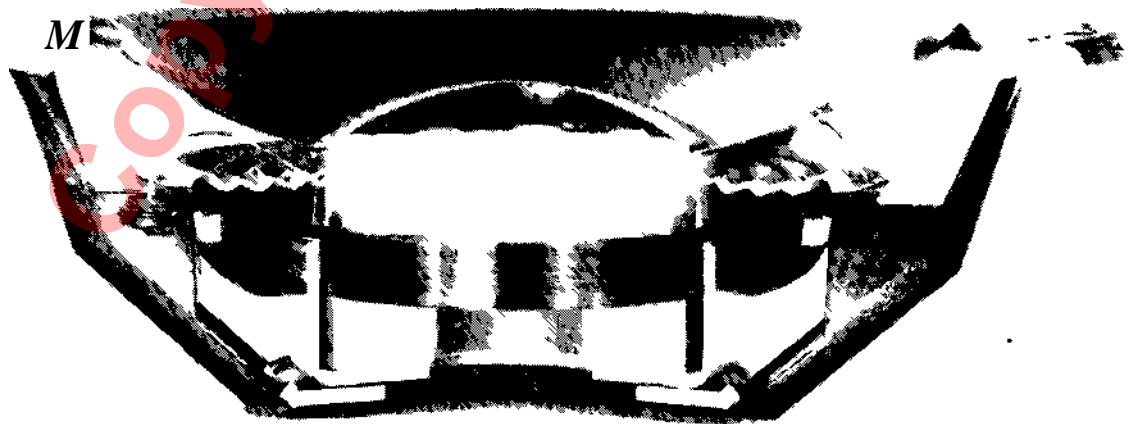
Nur mit viel Erfahrung und mit äußerst aufwendigen Messungen lassen sich all diese Parameter, die für Baßchassis und Treiber völlig unterschiedlich sind, bestimmen. Daraus entstehen Chassis mit ganz spezifischen Eigenschaften für diesen Einsatzbereich. Ein Compoundsystem mit Standardchassis aufgebaut, liefert nicht die erwarteten Resultate.

Die Abstimmung unseres Compoundsystems ist so diffizil, daß sie im Nachbau nicht selbst vollzogen werden kann. Darum bieten wir diese Spezialchassis nicht zur freien Anwendung an.

Allen Versuchen einiger Unbeirrbarer, trotzdem ein Compoundsystem zu bauen, ist mit äußerster Skepsis zu begegnen. Quantität im Baß ist nicht gleich Qualität - auch wenn der Stolz auf die eigene Konstruktion vielleicht über manches hinweghören läßt.

Alle von uns vorgeschlagenen Kombinationen sind so konstruiert, daß die Ergebnisse reproduzierbar sind. Exotische Lösungen mögen in der Werbung sehr wirkungsvoll sein, wenn das erwartete Ergebnis nicht eintritt, ist die Enttäuschung beim Anwender dafür um so größer.

Mit freundlichen Grüßen
W. Ehrenholz



Dynaudio 30 W 100, neueste Dynaudio Technologie, 100 mm Schwingspule und Centermagnet bringen höchste Belastbarkeit bei geringsten Verzerrungen

Alle zitierten Arbeiten sind unter www.SHACKMAN.de erhältlich

Mit unserem Wissen durften wir bisher zahlreichen Kunden bei der Konstruktion ihrer Lautsprecher assistieren

Woher haben wir diese Legitimation"

Das kommt ganz einfach daher Unser Team (= unser Wissen) faßt die unterschiedlichsten Qualitäten in verschiedenen Personen zu einzig Ihrem Vorteil in einem Unternehmen zusammen Da ist der HIFI-FREAK, der immer auf dem neuesten Stand ist und alles im Gesamtblick hat, der THEORETIKER, der spezielle Probleme zu lösen vermag, wenn auch oft nur mit Hilfe des Computers, der ENTWICKLER, der immer unzufrieden ist und dessen einziges Ziel es ist, immer weitere Verbesserungen zu finden, der STRENG KALKULIERENDE KAUFMANN, der zu Ihrem Vorteil für günstige Preis-Quahtatsrelationen sorgt

Zudem sind wir an fast allen zentralen Orten der Bundesrepublik mit Niederlassungen vertreten, sodaß Sie an Ort und Stelle per Demonstration und Argumentation beraten werden können Außerdem steht die Zentrale in Aachen zur Verfügung, die in jedem Falle alle Probleme koordinieren kann und für alles gerade steht

Des weiteren stehen uns in mehreren Städten der Bundesrepublik die modernsten Meßinstrumente zur Verfügung, sodaß alleine dies, ohne Berücksichtigung unserer, von uns immer wieder selbst in Frage gestellten Kompetenz, eine sich immer auf ütai aktuellen Stand der Technik befindtnde Beratungsquahtat garantiert

Dazu kommt eine eifrige Konkurrenz, die eilfertig versucht, unsere Neuigkeiten zu kopieren (s Karlson Coupler 1979, Einführung von Bauvorschlägen aus fremdsprachigen Fachzeitschriften 1978, hochwertige Luftspulen mit 1%iger Toleranz 1980, die TL 250 Harbeth 1981, unsere ZD-Horn Serie 1981) und uns damit zu immer weiteren Entwicklungen und Verbesserungen anspornte Alle diese angeführten Gründe haben unsere Kunden anerkannt und uns damit die Berechtigung bestätigt, auch für Sie beratend tätig zu sein

MEMBER OF

THE

AUDIO ENGINEERING SOCIETY

AUDIO / ACOUSTICS / APPLICATIONS

Untwisting all the chains that tie
The hidden soul of harmony.
MILTON.

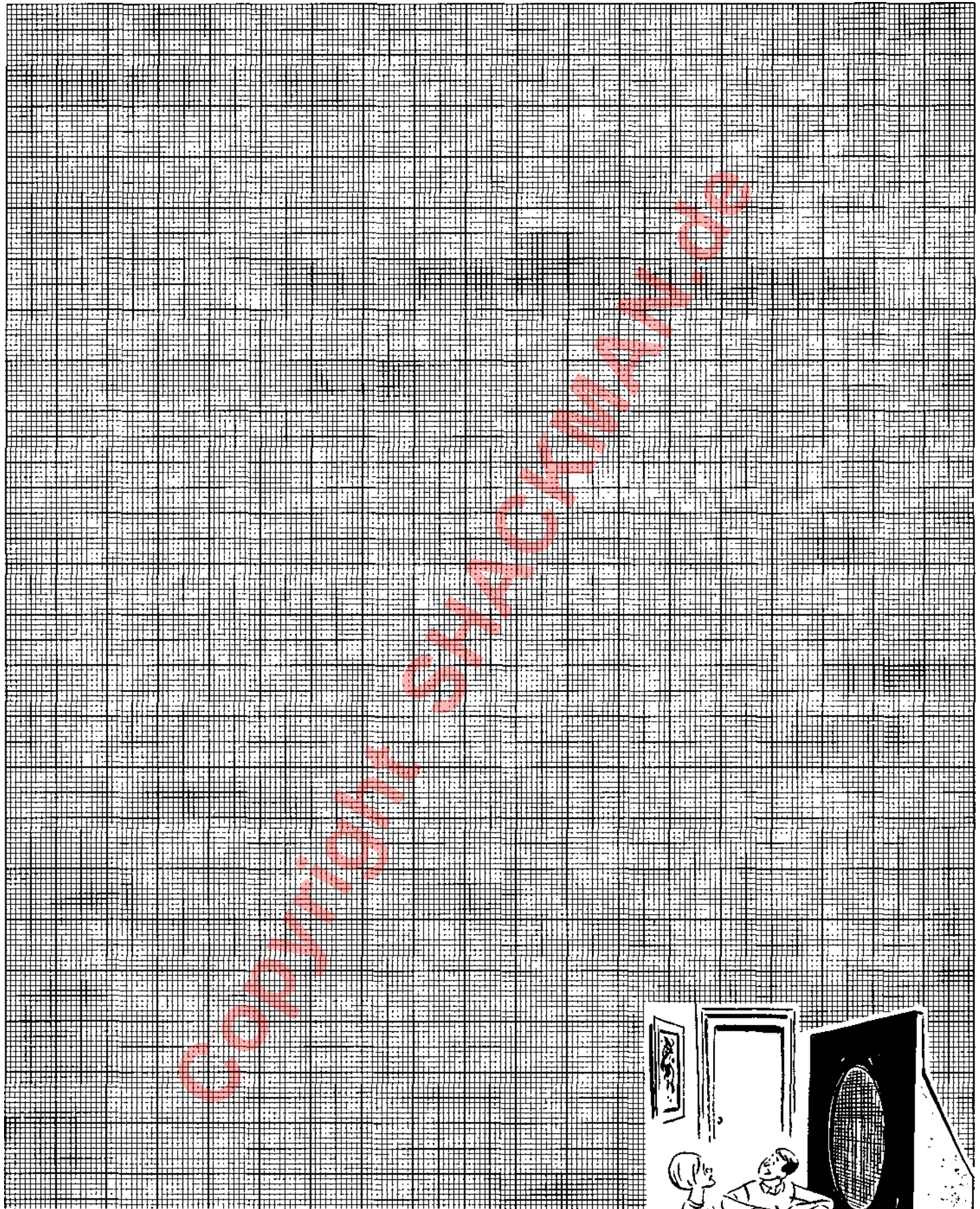
I must have hberty
Withal, as large a Charter as the wind,
To blow on whom I please.
As You Like It.

G. A. BRIGGS

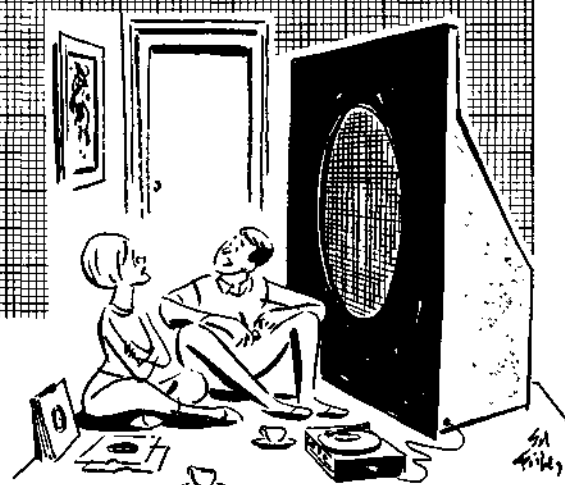


Alle zitierten Arbeiten sind unter www.SHACKMAN.de erhältlich

Skizze des Hörraumes



Je besser wir Ihren Hörraum kennen,
umso besser können wir Sie beraten.
Bitte vergessen Sie nicht,
dieses Blatt mitzuschicken!



"But, Muriel, what counts more—furniture or fidelity?"