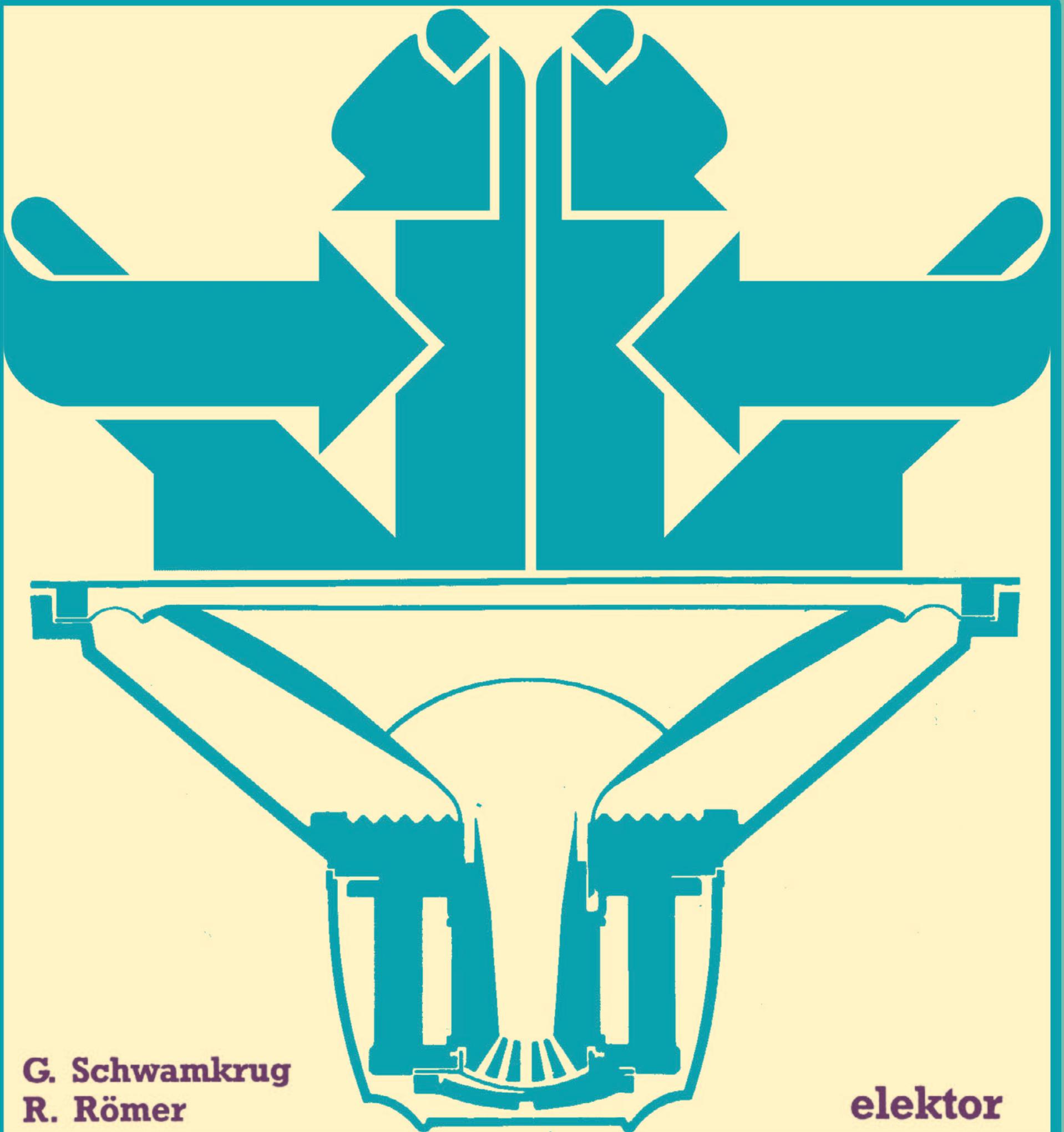


Lautsprecher

Dichtung und Wahrheit



G. Schwamkrug
R. Römer

elektor

Lautsprecher

Dichtung und Wahrheit

G. Schwamkrug
R. Römer

ISBN 3-921608-45-7
Elektor Verlag GmbH, 5100 Aachen

Inhalt

Vorwort	5	Übertragungsfunktionen	121
		Frequenzweichen	127
		Allpaß-Filter für 3-Wege Frequenzweichen	133
Kapitel 1		Einfluß der Gehäuse auf die Übertra-	
Lautsprecher im (Wohn)Raum	7	gungsfunktion	146
Das Ohr	9	Kapitel 4	
Raumresonanzen	16	Gehäusebauformen	153
Schalleistung, Schalldruck, Schallpegel,			
Schallenergie und Raumabsorption	22	Geschlossene Lautsprecherboxen	153
Raumakustik und Platz der Boxen	28	Compound-Gehäuse	172
Frequenzgang im Wohn- und Meßraum ..	34		
Baßwiedergabe mit einem Subwoofer ..	38	Kapitel 5	
Richtcharakteristik und Richtdiagramme ..	42	Baßreflexboxen	179
Kapitel 2		Ersatzschaltbild	181
Bewertung von Lautsprecherboxen	55	Abstimmungstabelle von Baßreflex-	
		gehäusen	186
Akustische Leistung, Eingangsleistung		Passivmembran	188
und Wirkungsgrad	55	Linkwitz-Filter	202
Verzerrungen	59		
Lautsprecherchassis	60	Kapitel 6	
Wirkungsweise	71	Messungen an Lautsprecherchassis und	
Magnetsysteme für Lautsprecherchassis ..	78	Lautsprecherboxen	213
Breitbandchassis	100		
Eine kleine Auswahl bekannter Laut-		Konstantspannungsmessung	215
sprecherchassis	104	Konstantstrommessung	218
		Messung mit Signalgenerator	219
Kapitel 3		Lissajou-Messungen	222
Theorie von dynamischen Lautsprecher-		Fernfeldmessung	224
chassis und Frequenzweichen	117	Nahfeldmessung	225
		Ground-Plane Meßverfahren	227
Ersatzschaltbilder und mathematische			
Zusammenhänge	117		

Vorwort

Das Buch ist das erste einer geplanten Reihe zum Thema Lautsprecher. Es vermittelt alle wichtigen Informationen, die beim Kauf oder Selbstbau von Lautsprecherboxen von Bedeutung sind. Darunter befinden sich auch die Informationen, die von anderer Stelle beharrlich totgeschwiegen oder schlicht vergessen werden. Trotz allem halten Sie kein Buch in Händen, das perfekte Antworten auf alle Fragen zum Thema Lautsprecherboxen und deren Einzelteile liefert. Das kann und soll nicht Sache dieses einen Buches sein; damit ließen sich mehrere Bücher (über)füllen.

Das Buch soll den Leser zum Experimentieren ermuntern. Das wichtigste Werkzeug im Akustikbereich ist die Kenntnis der Zusammenhänge und der Wechselwirkungen, nicht die dritte Stelle hinter dem Komma. Es ändert sich ja bereits die erste Stelle, wenn Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte dauernd schwanken. Trotzdem sind mathematische Zusammenhänge nicht unwichtig, wenn es um den Entwurf einer guten Box geht. Deshalb sind auch, trotz aller Bemühungen, den formalen Hintergrund auf ein Minimum zu begrenzen, etliche Formeln und Berechnungsbeispiele im Buch enthalten. Die Zusammenhänge sind gar nicht so kompliziert. Das Problem ist hier eher die Informationsflut der widersprüchlichsten Aussagen aller Beteiligten, die den Laien zur Verzweiflung treiben kann. Die Situation ist bekannt: Jeder Tester, Händler, Hersteller behauptet etwas anderes. Der eine redet nur über den Klang, andere nur über geheimnisvoll verschlüsselte Meßwerte, die mit immer exotischeren Apparaturen erfaßt werden. Wenn dann einmal Meßwerte und Klangbewertung zusammen veröffentlicht werden, gibt es zwischen beiden scheinbar überhaupt keinen greifbaren Zusammenhang, wodurch die Verwirrung noch größer wird.

Das Buch versucht u.a. folgende Fragen zu beantworten:

Welche Probleme hat eine Lautsprecherbox bei der Arbeit, weil der Besitzer beim Kauf nur auf die klanglichen Aspekte geachtet

hat? Das kann ärgerliche und teure Konsequenzen haben.

Welche Aussagen mancher Werbeabteilungen muß man mit allergrößter Skepsis betrachten, da sie nichtssagend, oft sogar irreführend sein können? Auch das kann zu ärgerlichen und teureren Konsequenzen führen. So z.B. zu einigen Experimenten, wenn man die teuer bezahlte Qualität zuhause auch tatsächlich hören möchte.

Es werden aber auch einige positive Aspekte aufgezeigt:

Das ist beispielsweise der hohe Wiedergabestandard, den heute selbst preiswerte Lautsprecherkombinationen erreichen können. Weiter positiv anzumerken ist die Verbesserung der Hifi-Wiedergabe durch nur einen relativ geringen elektronischen Aufwand, wenn am Ende der Wiedergabekette gute (nicht unbedingt die besten) Lautsprecherboxen mitspielen.

Um hier ein Optimum zu erreichen, müssen Sie als Leser allerdings ein wenig mitarbeiten. Der einfache Nachbau von Bauvorschlägen aus Fachzeitschriften ist mindestens ebenso riskant wie der Kauf einer Fertigbox, wenn es darum geht, optimale Ergebnisse in den eigenen vier Wänden zu realisieren. Bausätze und Fertigboxen sind nur solange Produkte mit genau definierten Eigenschaften, solange sie in den Entwicklungsabteilungen der Hersteller stehen. Jeder Ortswechsel verändert den (Klang)Charakter einer Lautsprecherbox oft auf eine kaum vorhersehbare Weise. Die oft widersprüchlichen Testberichte zu ein und der gleichen Box beweisen diesen Umstand recht deutlich.

Sie selbst können dagegen mit etwas Planung, Phantasie und Engagement erreichen, was selbst beim Kauf teuerster High-End-Boxen von Hersteller und Händler nicht garantiert werden kann: die High-End-Wiedergabe. Die Kosten sind dabei je nach den persönlichen Ansprüchen eher das Gegenteil von High-End.

Kapitel 1

Lautsprecher im (Wohn)Raum

Üblicherweise beginnen Bücher über Lautsprecherboxen mit einem Kapitel über die Eigenschaften des Übertragungsmediums Luft. Das liest sich dann ungefähr so:

Die Luft, ein Gasgemisch aus Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, diversen Edelgasen (Anm. d. Autors: und mittlerweile einigen weniger edlen gasförmigen und festen Bestandteilen) mit einer Dichte von $1,19 \text{ kg/m}^3$. Die Anwesenheit elastisch aufgehängter massebehafteter Luftmoleküle ermöglicht die Ausbreitung von Schallenergie durch Schwingung der Moleküle, wobei eine temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit von 344 m/s bei 20 Grad Celsius erreicht wird, usw.....

Wir versuchen es einmal andersherum. Ein Raum ohne Luft ist akustisch tot, das ist einleuchtend, aber Luft ohne Raum ist ebenfalls akustisch tot. Kennen Sie Musiker, die gerne im Freien spielen (Ausnahme sind vielleicht Alphornbläser, Dudelsackspieler o.ä.)? Oder kennen Sie den Klang einer Musikreproduktion über Lautsprecherboxen im Freien? Entweder es klingt überhaupt nicht, oder sehr fremdartig. Das Zusammenspiel von Raum und Luft ist ein unverzichtbares Element bei der Wiedergabe von Musik, egal ob live oder über Lautsprecher. Dabei kann das Zusammenspiel von Luft und Raum die Wiedergabe gleichzeitig verbessern und verschlechtern – als Raumakustiker kann man hier in Teufels Küche geraten. An einer Stelle ist der obere Baßbereich gut, dafür fehlt der Tiefbaß – an einer anderen Stelle ist es genau umgekehrt. In ganz gemeinen Fällen ist die Stereo-Ortung in der Mitte vor den Boxen schlechter als anderswo im Raum, oder aber gute Stereo-Ortung ist überhaupt nur an einer einzigen Stelle möglich. Auf der Suche nach dem Verantwortlichen ist dann immer der Raum schuld. Techniker und Lautsprecherverkäufer reden von Stehwellen, Resonanzen und Interferenzen. Pech gehabt, heißt es dann, da müssen Sie leider schon Ihren Wohnraum umbauen. Wissen Sie, ein Konzertsaal sieht ja auch ganz anders aus als Ihr Wohnzimmer. Womit man sich als völlig schuldlos aus der Affäre zieht. Ob das alles so richtig ist? Sollte die Kombination von Luft und kleinen Räumen

zum Beispiel den über Millionen Jahre perfektionierten Ortungsmechanismus des menschlichen Gehörs überlisten können?

Machen wir ein Experiment. Versuchen Sie im Freien einmal, mit einem zugehaltenen Ohr die Position einer Schallquelle zu orten. Wiederholen Sie das Experiment in Ihrem Wohnzimmer. Ergebnis: Das Ortungsvermögen im Freien ist mit nur einem Ohr (gelingend gesagt) miserabel, im Raum dagegen verblüffend gut. (Besonders, wenn Sie versuchen, die Position Ihrer Stereoboxen festzustellen.) Offensichtlich unterstützt der Raum die Ortungsfähigkeit des menschlichen Gehörs ganz erheblich, egal, ob es sich dabei um einen Konzertsaal oder ein Wohnzimmer handelt. Neben diesem grundsätzlich positiven Aspekt der Kombination Luft/Raum lassen sich negative Auswirkungen natürlich nicht wegdiskutieren. In vielen Fällen kann man an bestimmten Stellen im Raum nicht unbedingt von Baßwiedergabe reden, einige tiefere Frequenzen sind offensichtlich völlig verschwunden. Selbst durch den Einsatz von Baßlautsprechern schwersten Kalibers oder mit extra dafür entwickelten Equalizern wird die Sache nicht besser. In anderen Fällen glaubt man, bei der Wiedergabe bestimmter Musiksignale im Raum ein Echo zu hören, anschließend stören eigenartige Geräusche die Stereo-Ortung und den Klang für kurze Zeit. Das unterscheidet diesen Echoeffekt von den Vor- oder Nachechos, die jeder Hifi-Fan von Schallplatte und Tonbandaufnahmen kennt. Letztere entstehen durch Deformation der Nachbarrillen beim Schneidvorgang einer Schallplatte oder durch Kopiereffekte beim Tonbandmaterial. (Bei CDs sind sie daher ein deutliches Indiz für ein nicht ganz so digitales Aufzeichnungsverfahren). Die erstgenannten Klangstörungen entstehen als Folge sogenannter Serien, auch bekannt als Flatterechos im Abhörraum, bei der eine Überlagerung von Reflektionen das Gehör irritiert.

Auch hierzu ein Experiment.

Stellen Sie sich in die Mitte zwischen zwei größeren Gebäuden, die in ca. $20...30 \text{ m}$ Entfernung parallel zueinanderstehen und klatuschen Sie einmal in die Hände. Was Sie hören sollten, ist ein Echo mit einer Wiederholungs-

zeit von etwa $100 \text{ ms} = 0,1 \text{ s}$ (15 m zur Wand und 15 m zurück gleich 30 m bei einer Schallgeschwindigkeit von 344 m/sek ergibt ca. 0,1 Sekunden Laufzeit). Zu hören ist jedoch ein knallartiges Geräusch mit hohem Energiegehalt im Bereich von 1000 Hz. Hier wird offensichtlich das Gehör mit der Abfolge der Reflektionen nicht so recht fertig; Reflektionen von schallharten Wänden können also nicht nur eine Verbesserung, sondern auch eine Verschlechterung von Klang und Ortbarkeit verursachen.

All das ist eine Folge der Anwesenheit von Luft in Räumen, durch die das komplexe Wechselspiel von Schallausbreitung und Reflektionen ermöglicht wird. Da diese Raumreflektionen immer positiven wie negativen Einfluß auf das Klangeschehen (wie z.B. Baßwiedergabe, Ortbarkeit und Klangfarbe) haben kann, ist es falsch, die Kombination Luft/Raum als den Schuldigen hinzustellen. (Das passiert jedoch immer wieder. Es ja wirklich eine sehr plausible Entschuldigung für Hersteller weniger guter Lautsprecherboxen sowie schlecht informierter Händler und Verkäufer.)

Wo sind die tatsächlichen Verursacher der negativen Effekte bei der Hifi-Wiedergabe in Wohnräumen? Meist stehen sie in Form (oft teuerster) Hifi-Boxen unschuldig im Wohnraum oder lauschen als präzisestes Meßgerät, das jemals für Audio-Messungen entwickelt wurde, andächtig den Werken bekannter Komponisten und leider oft auch den Machwerken einiger Lautsprecherkonstrukteure. Es ist dabei sehr interessant, daß ausgerechnet viele sehr teure und meßtechnisch angeblich vollkommen optimierte Lautsprecherboxen bei der Stereowiedergabe selbst in Erscheinung treten und vom Gehör sofort geortet werden. Das Bestreben der Konstrukteure, mit der Box auch kleinste Details des Musikgeschehens zu reproduzieren, führt dazu, daß die Boxen bei der Reproduktion ihre eigenen sehr charakteristischen Merkmale mit ins Spiel bringen und so als zusätzliche Musikinstrumente deutlich ortbar werden.

Die eigentlichen Verursacher der größten Probleme bei der Hifi-Wiedergabe sind einmal falsch konstruierte Lautsprecherboxen. Sie sind zwar möglicherweise meßtechnisch optimal, können aber nicht harmonisch (im Sinne von wohlklingend) in einen normalen Abhörraum integriert werden. Zum anderen sind es die Besitzer und Käufer von Lautsprecherbo-

xen, die bei der Auswahl ihrer Boxen und bei der Aufstellung leider oft haarsträubende Fehler machen. Von Werbeprospekten und schlecht informierten Verkäufern irritiert (es wird hier niemandem mangelnde Seriösität unterstellt), fällt die Kaufentscheidung letztendlich nach der Optik, den Meßwerten und Testberichten.

Es ist so eine Sache mit Meßgeräten und Meßwerten im Bereich der akustischen Reproduktion. Nichts kann einen Lautsprecherkonstrukteur besser zu diversen Konstruktionsfehlern verleiten als gute Meßergebnisse in der Entwicklungsphase. Letztendlich sind nach Abschluß der Entwicklung die Meßergebnisse perfekt, aber ob das Gehör auf die Aussagen der primitiven elektronischen Meßgeräte etwas gibt, ist eine ganz andere Sache. Das folgende Experiment, diesmal aus der Psychoakustik, beweist es. Wenn Sie über Kopfhörer einen Ton tiefer Frequenz zu einem Ohr, gleichzeitig einen Ton höherer Frequenz zum anderen Ohr senden, dann nimmt man die beiden Töne so wahr, wie sie sind. Vertauschen Sie jetzt beide Töne in immer kürzeren Intervallen. Plötzlich ist ein Punkt erreicht, an dem die tiefe Frequenz nur noch auf einem Ohr, die höhere Frequenz auf dem anderen Ohr zu hören ist. Das auch dann, wenn tatsächlich genau das Gegenteil zu den Ohren gesendet wird. Mit anderen Worten: Das Gehör empfängt Signale anders als sie zum Meßwertempfänger Ohr gesendet werden. Eine Kontinuität gibt es bei diesem Effekt nicht; er kann plötzlich umkippen. Dann vertauschen sich die Frequenzen, die man zu hören glaubt. Wenn Sie dagegen den Kopfhörer umdrehen, ändert sich nichts, so daß vom Sender Kopfhörer dieser Effekt also nicht herrühren kann. Das kleine psychoakustische Experiment beweist: Die veröffentlichten und oft arg strapazierten Meßwerte sind für unser Gehör ohne allzu große Bedeutung. Sie sollten folglich auch kein absolutes Qualitätskriterium für die Kaufentscheidung bei einer Lautsprecherbox sein. Auch bei den folgenden Betrachtungen über die Schallausbreitung im Raum spielen die Meßergebnisse keine Rolle.

Jeder Lautsprecher besteht aus einer oder mehreren Flächen, die durch ihre Bewegung Luft komprimieren oder expandieren. So entstehen die akustischen Signale, die sich im Raum ausbreiten. (Das Prinzip der bewegten Flächen gilt auch bei exotischen Lautspre-

chern wie z.B. dem Ionenhochtöner. Hier wird die bewegte Fläche durch die Grenzschicht zwischen ionisierter und nicht ionisierter Luft gebildet.) Die vom Lautsprecher produzierten Signale breiten sich im Abhörraum aus – dabei können neue Signale und scheinbare (virtuelle) Signalquellen entstehen. Das Gehör bewertet alle diese Signale bei seiner Schwingungsanalyse als störend oder hilfreich. Das ist für jeden Hifi-Fan ein triftiger Grund, sich mit der Eigenschaft von Luft in Räumen zu befassen. Jeder Raum ist etwas anders, und kein Lautsprecherhersteller kann wissen, wo und in welchem Raum seine Boxen später aufgestellt werden. Es wird daher nie eine Universal Hifi-Box geben. (Auch wenn es bei einer aktiven Lautsprecherbox durchaus möglich wäre, geeignete Filterschaltungen gleich einzubauen, ist dies wohl eine Kostenfrage, woran die Überlegung scheitert.)

Sie müssen hier selbst ans Werk gehen. Durch die Auswahl der Box, koordiniert mit der richtigen Aufstellung im Raum und dem optimalen Abhörplatz, lassen sich die negativen Effekte vermeiden, ohne die positiven Eindrücke zu stören. So ist es neben anderen Dingen (z.B. der Lautsprechertheorie) Ziel dieses Kapitels, Frequenzgangfehler durch das falsche Aufstellen der Box im Abhörraum zu vermeiden. Im Klartext: Sie wissen dann, warum der Wohn-

raum aus einer teureren Hifi-Box mit linearem Frequenzgang eine sprechende Holzkiste mit Frequenzgangfehlern von mehr als +9 dB bis -11 dB machen kann.

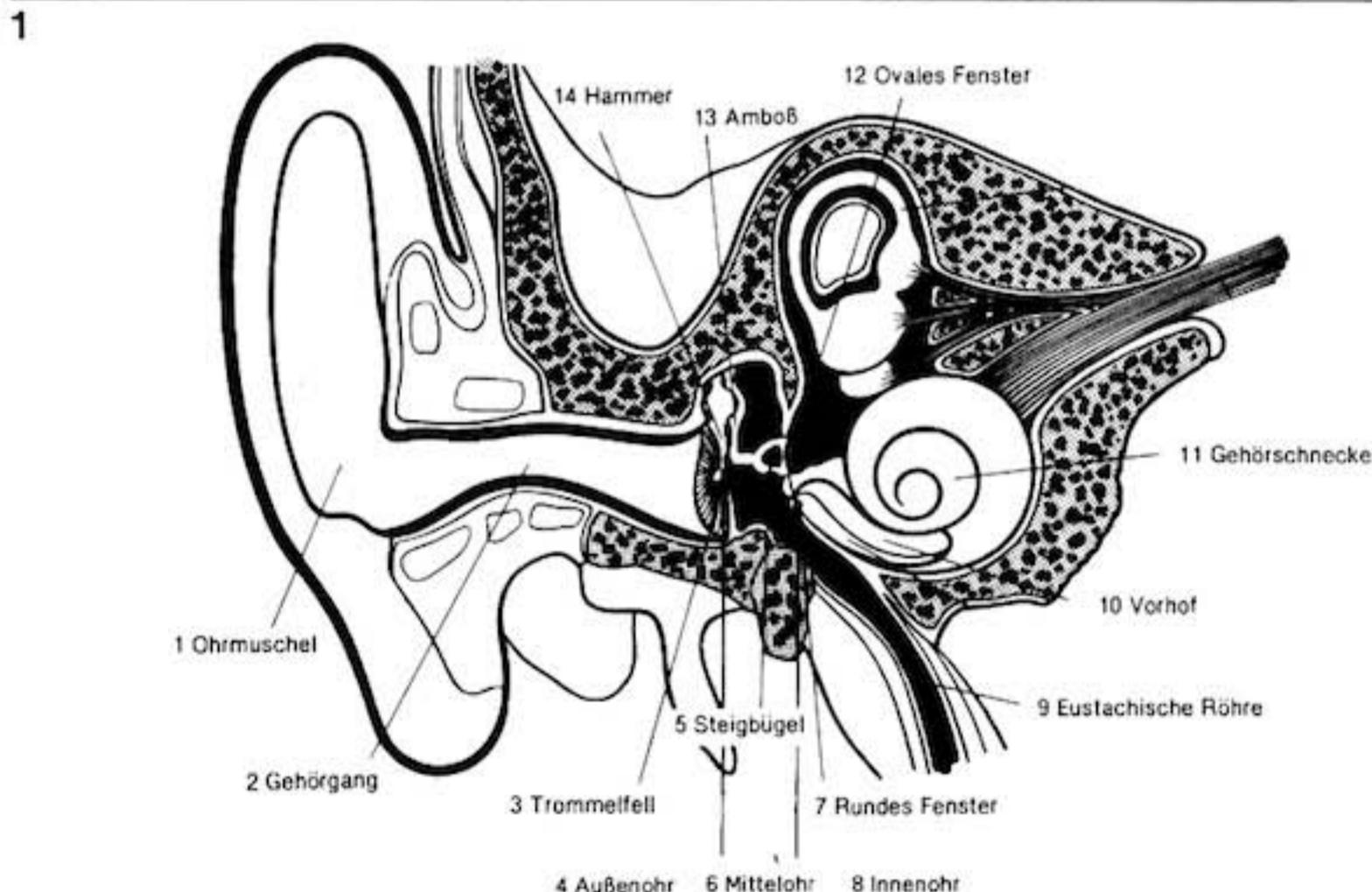
Das Ohr

Zur genaueren Erklärung aller Vorgänge in der Luft/Raum-Kombination befassen wir uns kurz mit dem Meßwertaufnehmer des menschlichen Gehörs: dem Ohr.

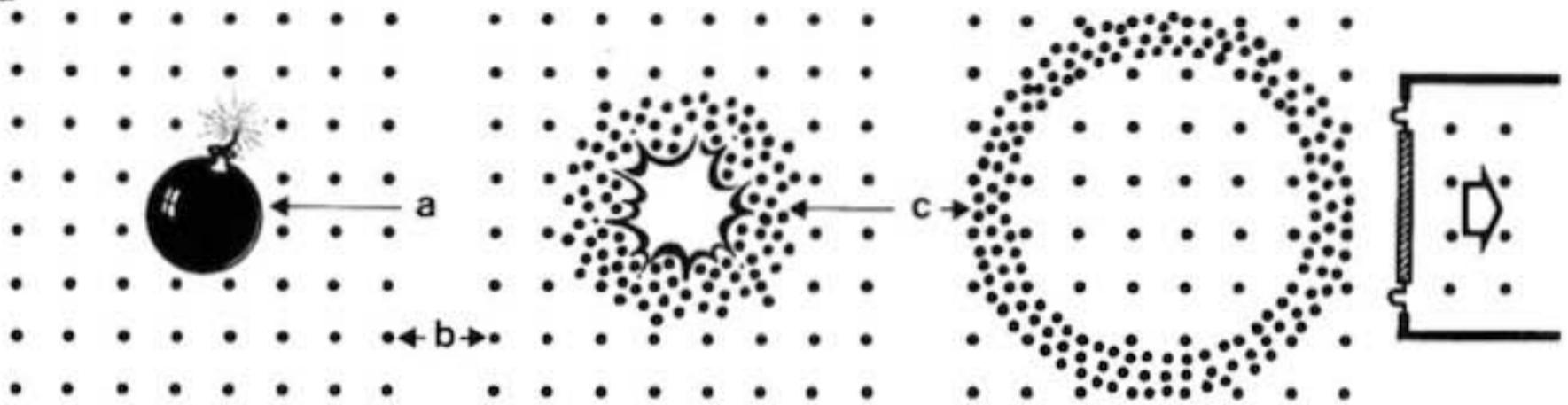
Das Ohr ist im Prinzip ein Druckaufnehmer oder Druckempfänger, der, ähnlich der Membran eines dynamischen Tauchspulenmikrophons, auf Druckwechsel an der Membranoberseite reagiert.

Ändert sich der (Luft)Druck am Ohr (z.B. durch eine Ex- oder Implosion) in Form einer Schwingung um den normalen Luftdruck, so wird ab einer Frequenz (Zahl der Schwingungen pro Sekunde) von 15 Hz vom Datenauswertungsmechanismus Gehör der Schall wahrgenommen.

Bild 1.1. Der Meßwertaufnehmer "Ohr" im Schnitt.



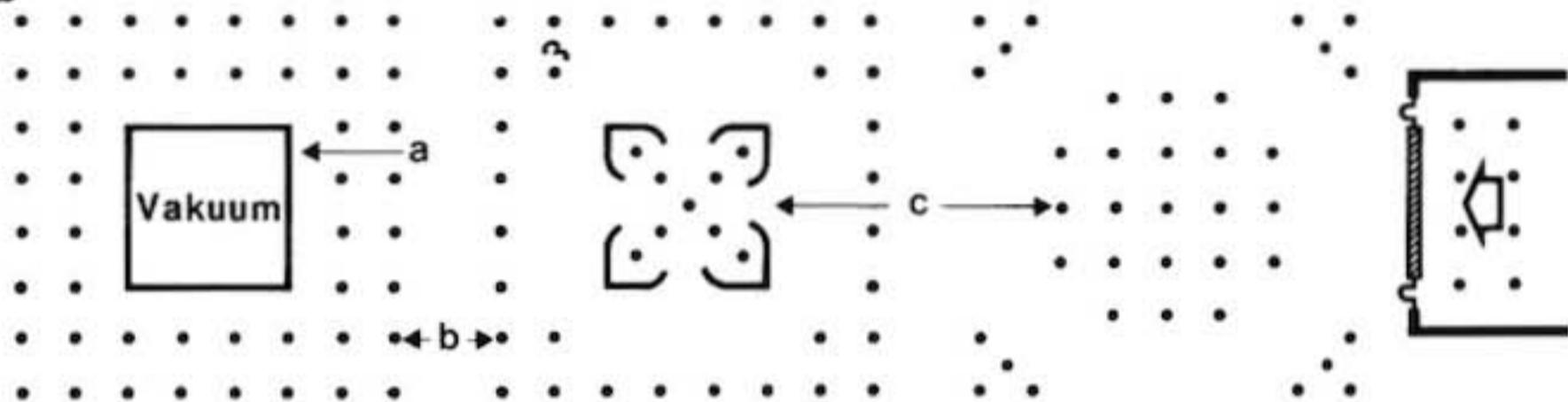
2a



- a. Eine "Schallquelle" (bitte etwas Geduld).
- b. Luftmoleküle bei normalem Luftdruck.
- c. Hoher Druck und komprimierte Luft (P_+).
- ↔ Richtung der Membranbewegung

86902-1.2a

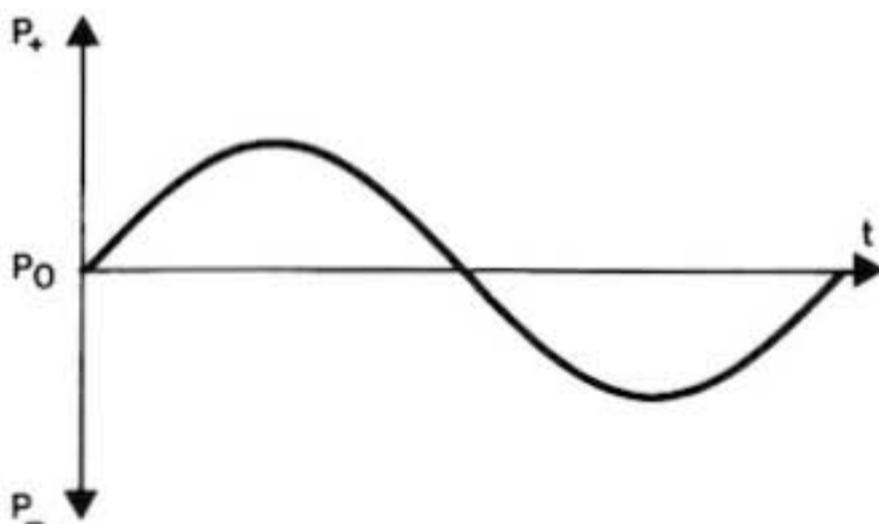
b



- a. Ebenfalls eine "Schallquelle".
- b. Luftmoleküle bei normalen Luftdruck.
- c. Unterdruck und expandierte Luft (P_-).
- d. Richtung der Membranbewegung.

86902-1.2b

3



P = Luftdruck
t = Zeit

86902-1.3.

Bild 1.2. Bei einer Explosion (Bild 1.2a) breitet sich eine Überdruckwelle kugelförmig um das Zentrum aus. Das geschieht auch mit der Unterdruckwelle bei einer Implosion (Bild 1.2b).

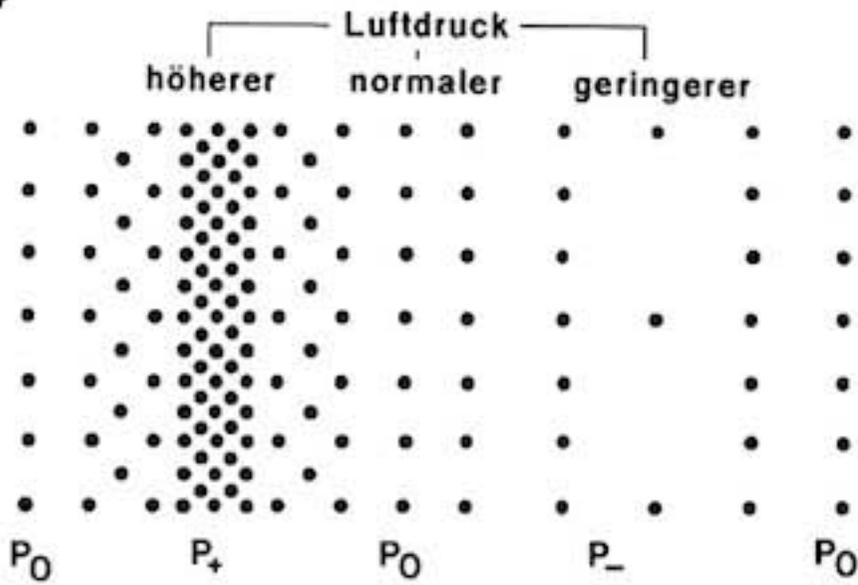
Treffen die Druckwellen nach einiger Zeit auf eine Mikrofonmembran, entsteht dort zwischen der Vorder- und Rückseite eine Druckdifferenz. Sie schließlich verursacht die Membranbewegung.

Bild 1.3.

Bild 1.4. Verteilung der Luftmoleküle in einer (angehaltenen) Schallwelle.

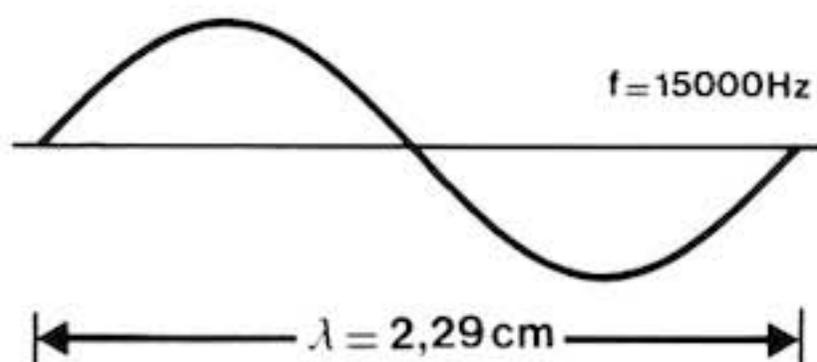
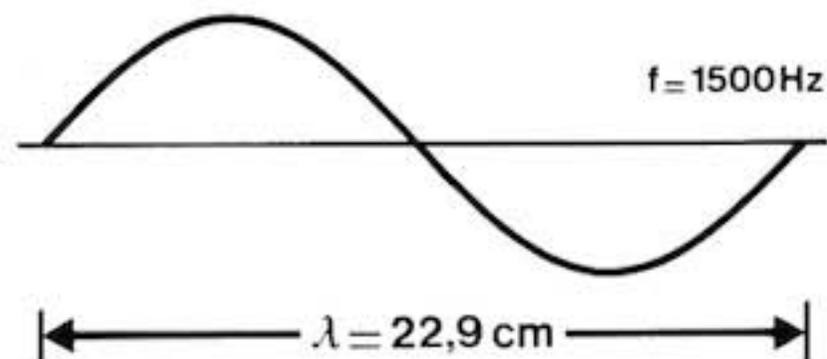
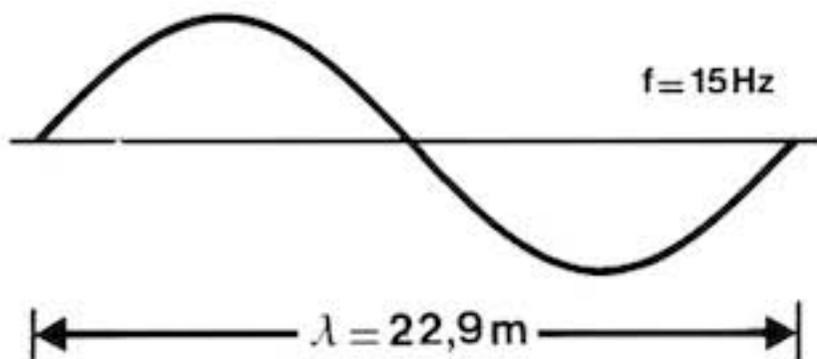
Bild 1.5. Über die Gleichung $L = c/f$ lässt sich jeder Frequenz eine bestimmte Wellenlänge zuordnen. L ist die Wellenlänge Lambda, c die Schallgeschwindigkeit der Luft mit 344 m/s bei 21 Grad Celsius und f ist die Frequenz in Hertz (1/s).

4



86902-1.4.

5



Übertragen auf ein Luft/Raum-Modell ist gerade für Hifi-Fans die folgende Schlußfolgerung sehr wichtig: Befindet sich der Meßwertempfänger Ohr (samt der Datenverarbeitung) in einem kleinen Raum, wird außerdem die gesamte Luft im Raum gleichmäßig komprimiert und expandiert (zum Beispiel durch eine Lautsprechermembran wie im Bild 1.6), dann nimmt ab einer Frequenz von 15 Hz das Gehör den Schall wahr.

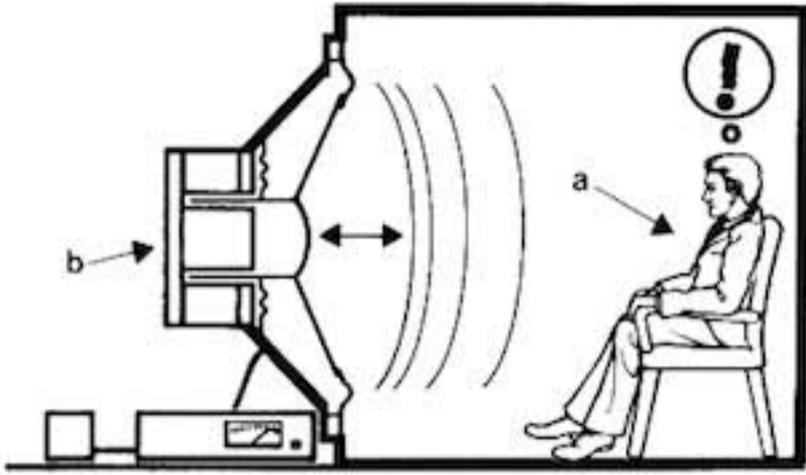
Es ist also völliger Unsinn, wenn immer behauptet wird, tiefe Frequenzen wären in kleinen Räumen nicht reproduzierbar. Eher das Gegenteil ist der Fall. In größeren Räumen gibt es hier meist einigen Ärger mit Stehwellen, wie sich noch zeigen wird. Der Begriff Druck bzw. Druckwechsel beschreibt natürlich nicht nur das geschilderte Druckkammermodell, sondern auch jede Schallwelle. Die Schallwellen sind beim Druckkammermodell wesentlich größer als die Abmessungen der Druckkammer selbst. Es paßt damit zu einer Zeit immer nur ein Zustand, entweder mehr oder weniger (Luft)Druck in der Kammer, aber nicht die ganze Schallwelle. Schallwellen, die unser Ohr aufnimmt, weisen einen schwankenden Druck auf, mal niedriger, mal höher, mal gleich dem normalen Luftdruck. Die Schallwelle ist übrigens die normale Ausbreitungsform (Fortbewegungsart) der Schallenergie.

Eine gleichmäßige, rein sinusförmige Schallwelle wie in Bild 1.8a kommt normalerweise nur sehr selten vor. Weit verbreiteter sind die komplexen akustischen Signale aus Bild 1.8b. Sie lassen erkennen, welches hohe Auflösungsvermögen für Frequenz und Amplitude das Ohr haben muß, damit es mit solchen Signalen zurechtkommt.

Die Voraussetzung für Schallwellen ist ausreichend viel Raum. Um das zu demonstrieren, halten wir eine Schallwelle einmal an – wir erzeugen eine Stehwelle. Damit befinden wir uns im Grenzbereich zwischen dem Druckkammermodell und der wellenförmigen Ausbreitung von Schallenergie. Das ist gleichzeitig der Bereich, wo zu einem großen Teil über die Baßwiedergabe jeder Lautsprecherbox entschieden wird (völlig unabhängig davon, welche schönen Meßprotokolle der Schalldruckwiedergabe der Hersteller mitgeliefert hat).

Um eine Schallwelle anzuhalten, stellt man ihr ein schallhartes Hindernis in den (Ausbreitungs)Weg. Ein Verfahren, das nicht gerade neu ist, wenn es darum geht, igendetwas an-

6



a. Ein "Meßwertaufnehmer",
b. Ein größeres Lautsprecherchassis.

86902-1.6.

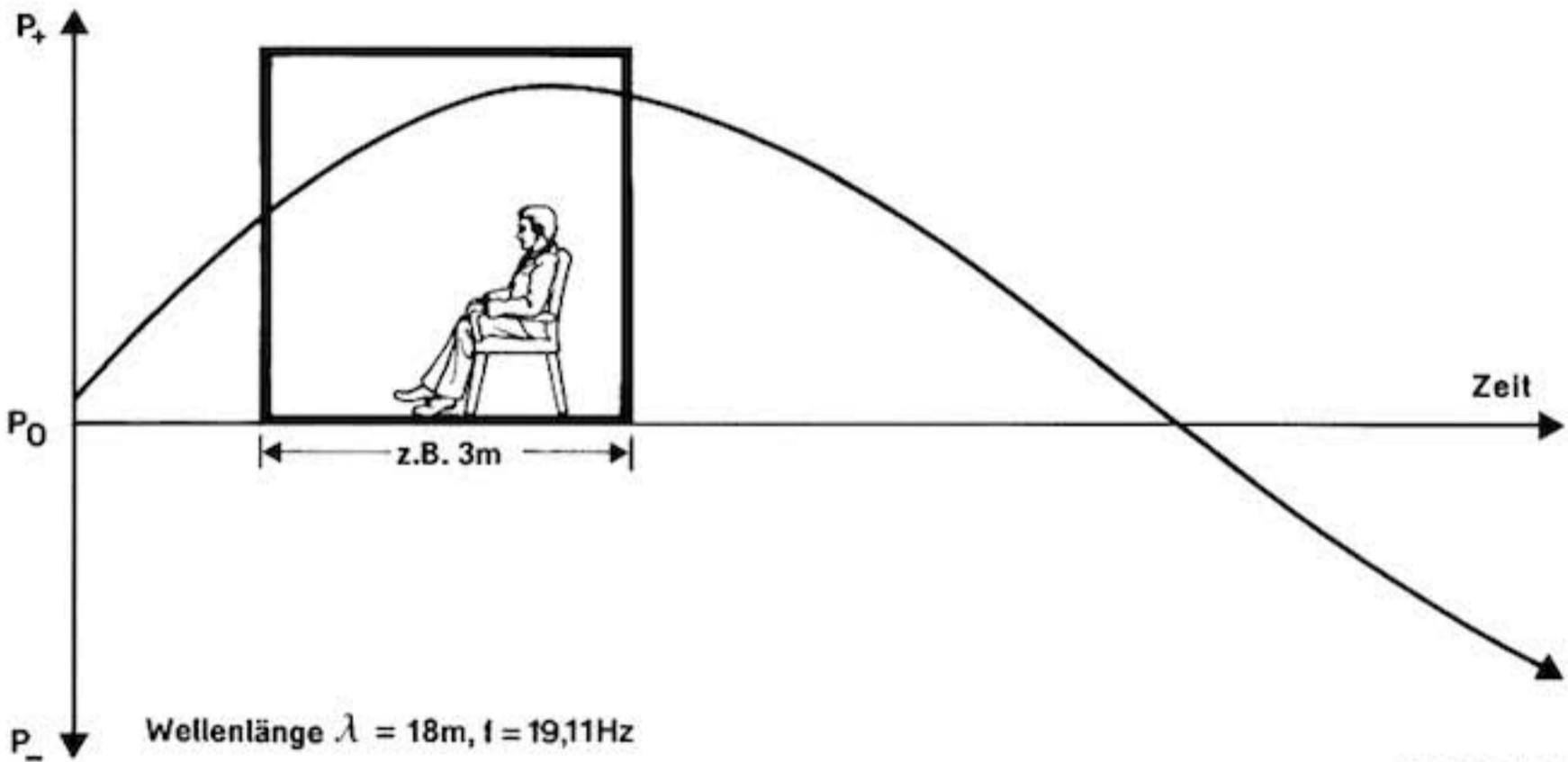
Bild 1.6. Ein Meßwertaufnehmer im Testraum.

Bild 1.7. Der Meßwertaufnehmer empfängt Überdruck oder Unterdruck ebenso wie bei einer gleich langen Schallwelle im Freien.

Bild 1.8. Schalldruckwechsel bei sinusförmigen Signalen (a) und bei komplexen Signalen (b).

Bild 1.9. Eine Schallwelle an einem Hindernis. Die Pfeile symbolisieren die maximale Schnelle der Luftmoleküle beim Ausgleich von Über- und Unterdruck.

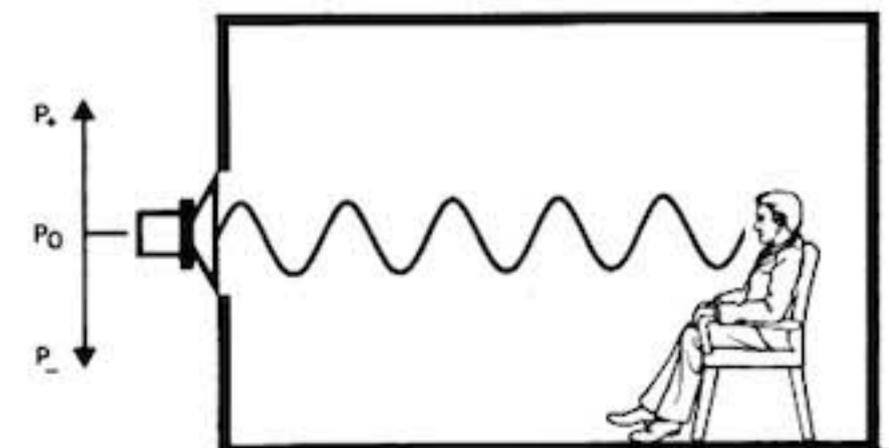
7



86902-1.7.

8a

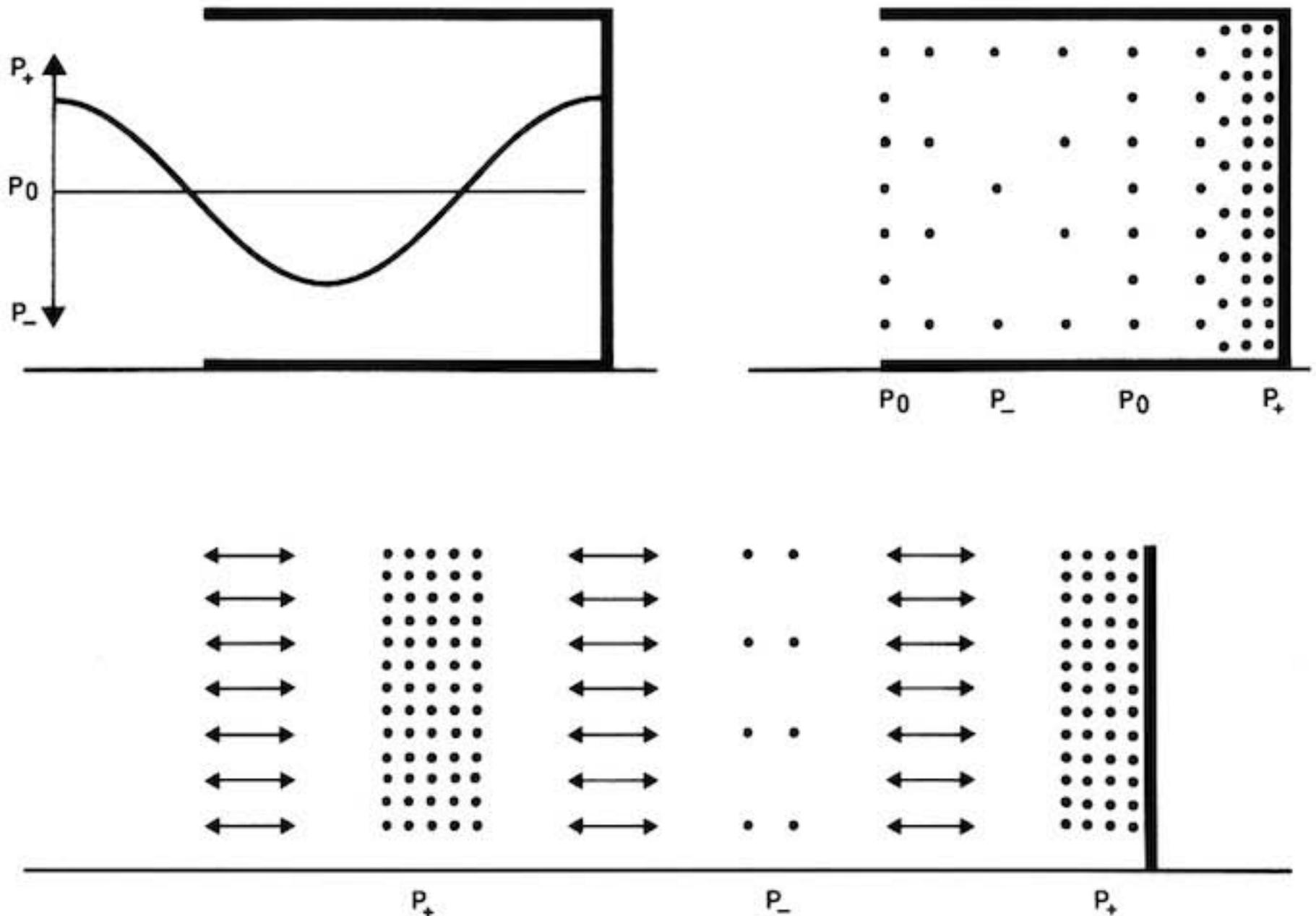
b



86902-1.8a



86902-1.8b



zuhalten. Wer nun denkt, mit Ausnahme der Zeit, der irrt, denn die wird gleich mit angehalten; allerdings nur akustisch.

Für den Akustiker und Hifi-Fan wird es jetzt interessant. Die Schallwelle quittiert jedes Bremsmanöver mit einem (Über/Unter)-Druckmaximum an dem Hindernis. Warum? Die Erklärung ist recht einfach. In einer Schallwelle finden sich Zonen mit maximalem Über- und Unterdruck. Das heißt: Einem definierten Luftvolumen werden Luftmoleküle zugeführt oder abgezogen. Dafür muß also eine Bewegung der Luftmoleküle stattfinden.

Die Bewegung der Luftmoleküle, auch Schnelle genannt, ist in den Zonen maximalen (Über/Unter)Drucks gleich Null. Die Moleküle kehren hier ihre Bewegungsrichtung um. Genau in der Mitte zwischen den beiden Druckmaxima erreichen sie dagegen ihre maximale Geschwindigkeit, es entsteht ein Schnellemaximum. An einem schallharten Hindernis ist dagegen mit Schnelle nicht viel zu machen. Das Hindernis steht ja gerade der Molekülbe-

wegung im Weg. Es stellt sich daher ein Zustand ein, bei dem sich die Moleküle nicht bewegen. Das ist grundsätzlich nur bei einem der Druckmaxima der Fall. Das gilt für alle Frequenzen, wie das Bild 1.10. zeigt.

Die Schallenergie geht natürlich an dem Hindernis nicht verloren, weil es ja schallhart (reflektierend) ist. Das Gegenteil hiervon ist schallweich (absorbierend). Das Hindernis reflektiert die Schallenergie, wie ein Spiegel das Licht reflektiert (mehr oder weniger viel, aber immer in eine bestimmte Richtung). In Bild 1.11. ist dies optisch dargestellt.

Die Frequenz der reflektierten Schallwelle ist in der gezeichneten Hörerposition überhaupt nicht wahrnehmbar. Der Faktor Zeit ist eliminiert, da keine zeitlichen Änderungen des Schalldrucks feststellbar sind. Will man in dieser Situation mit einem Equalizer die Frequenz kräftig anheben, ist das Ergebnis verblüffend: Es gibt keinerlei Veränderung des Höreindrucks gegenüber vorher. Warum das so ist, zeigt Bild 1.12. ganz eindeutig.

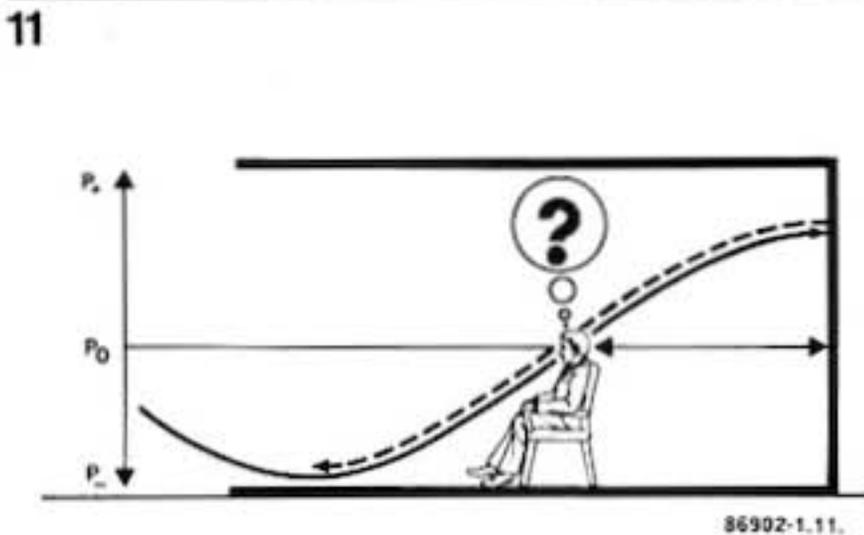
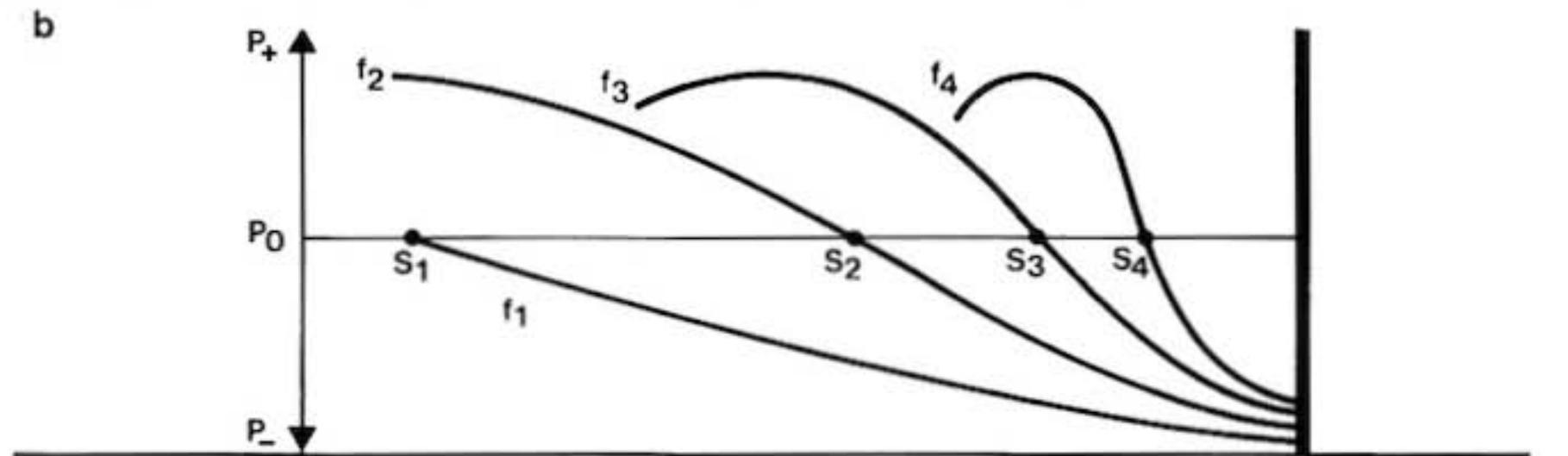
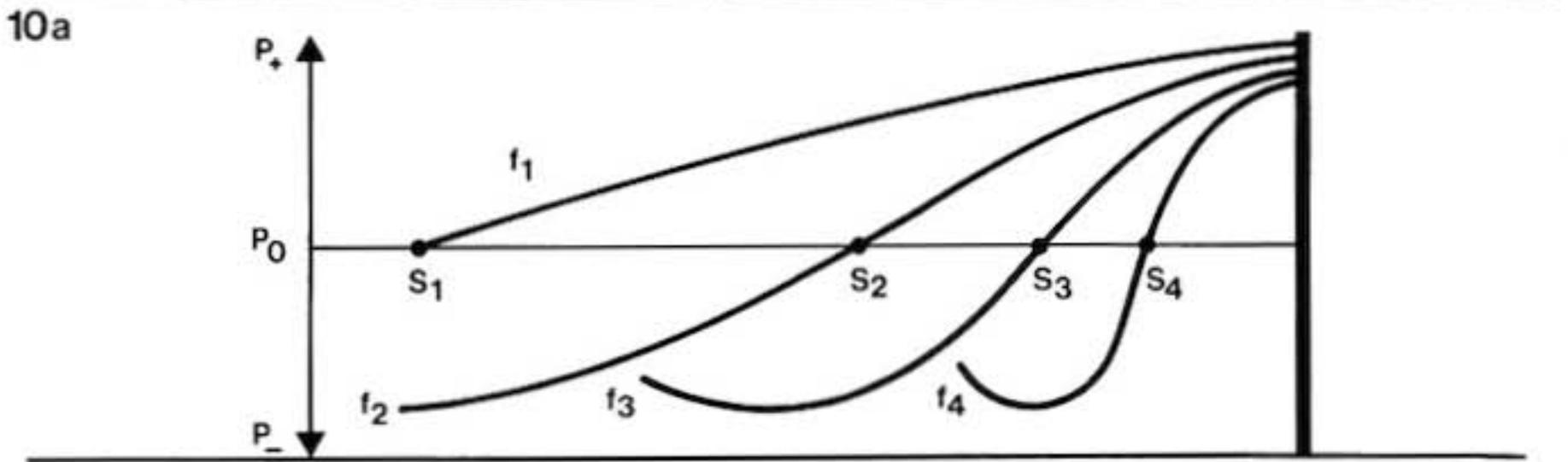


Bild 1.10. Für alle Frequenzen bildet sich an einer schallharten Wand ein Über- oder Unterdruckmaximum. Im Abstand einer Viertel-Wellenlänge ($\lambda/4$) ist immer ein Schnellemaximum zu finden (S1 bis S4).

Bild 1.11. Die einfallende Schallwelle wird von der Wand reflektiert (gestrichelte Welle). Ist der Hörplatz $\lambda/4$ von der Wand entfernt, wird weder die Schallwelle noch deren Reflektion hörbar.

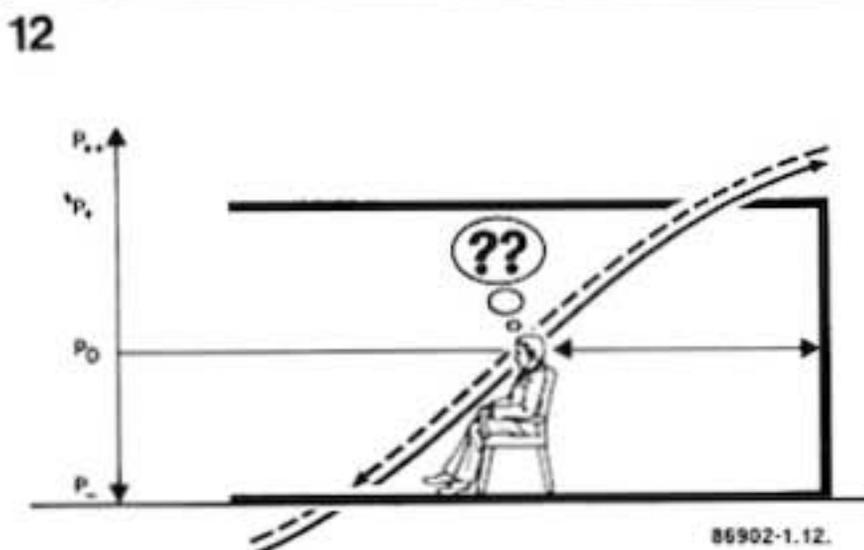
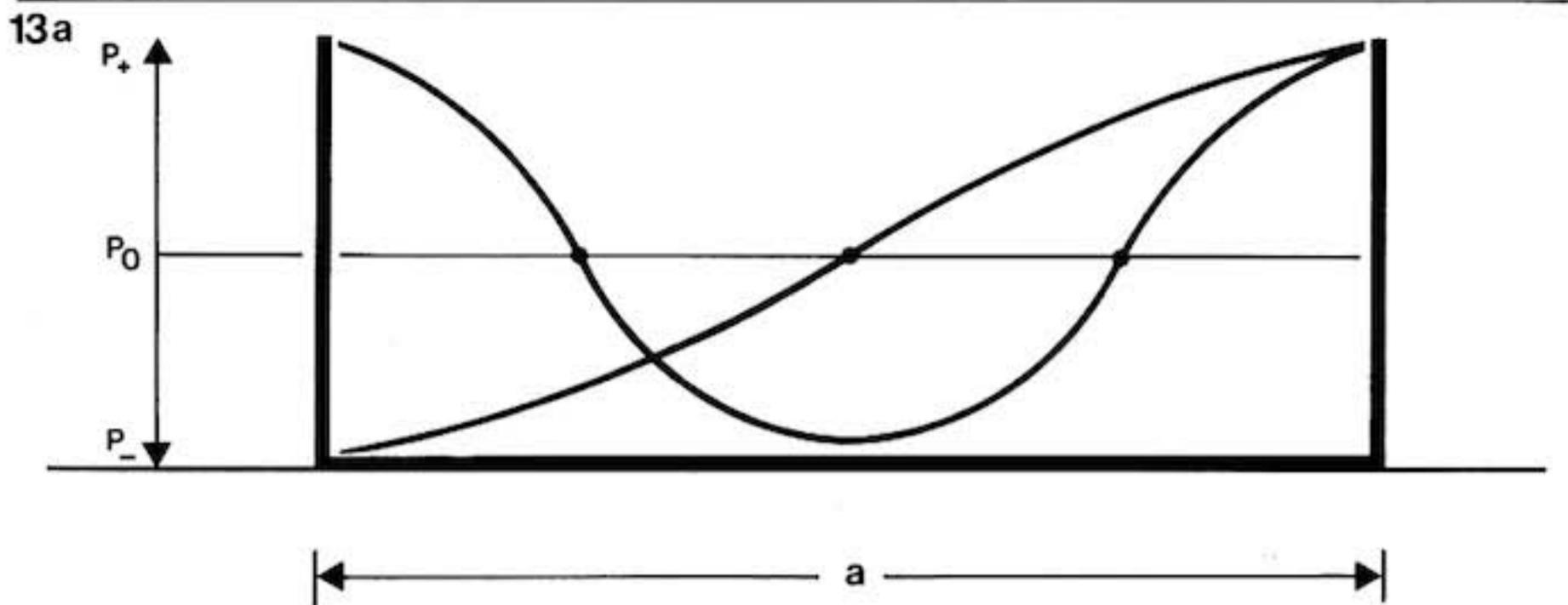


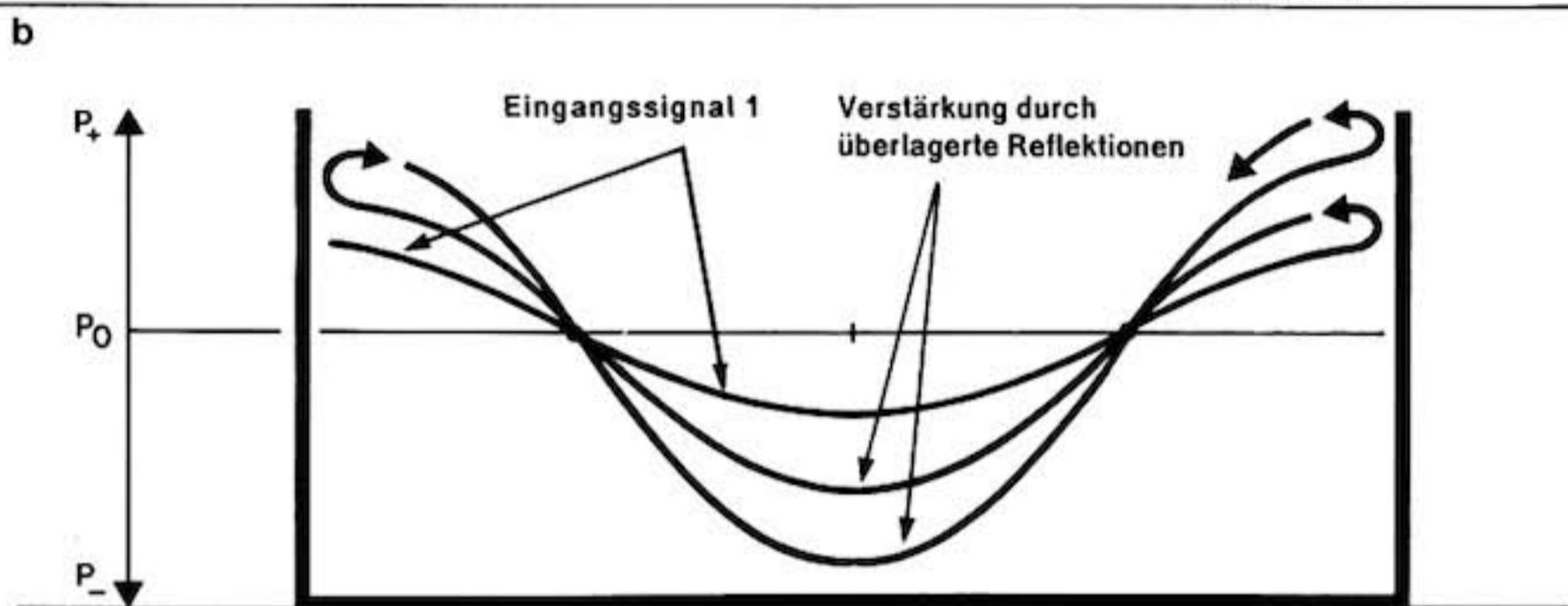
Bild 1.12. Die Anhebung des Schalldrucks mit einem Equalizer hat auf den Höreindruck keinerlei Einfluß.

Bild 1.13a. Stehwellen bilden sich bei allen Frequenzen. Die Wellenlänge λ dieser Stehwellen errechnet sich aus der Raumlänge a dividiert durch 0,5– 1– 1,5– 2– usw. Die Frequenz ergibt sich aus der Schallgeschwindigkeit c dividiert durch λ .

Bild 1.13b. Durch deckungsgleiche Überlagerung der Schallwellen kommt es zu einer Verstärkung des Schalldrucks in den Druckmaxima.



86902-1.13a.



86902-1.13b.

Ein Wohnraum besteht in der Regel nicht nur aus einer, sondern aus vier Wänden sowie der Zimmerdecke und dem Fußboden. Die Wahrscheinlichkeit, daß der Hörer zu allen Wänden den gleichen Abstand hat, ist denkbar gering. Es kann so nicht zur völligen Auslöschung bestimmter Frequenzen kommen, sondern nur zur Einbrüchen in der Übertragungskurve. Die können aber ca. 20 dB betragen und haben mit Hifi-Wiedergabe nicht mehr das geringste gemeinsam. (Der Begriff dB = Dezibel wird hier einfach einmal als bekannt vorausgesetzt, genaueres dazu folgt später noch.)

Warum mehrere Wände von Vorteil oder von Nachteil sind, wollen wir direkt untersuchen. So wie zwei dieser Wände parallel zueinander stehen, finden wir die bereits gesuchten Stehwellen. Zwischen zwei parallelen Wänden, für die das gleiche Gesetz des Druckmaximums gilt, lassen sich einige genau bestimmte

Schallwellen unterbringen. Es sind die, deren Wellenlängen in einem bestimmten Verhältnis zum Abstand der Wände stehen.

An beiden Wänden sind Druckmaxima bzw. Druckminima zu finden. Nach den Gesetzen der Optik und Akustik (siehe Reflektion durch Spiegel) überlagert sich die reflektierte Schallenergie mit dem Originalsignal deckungsgleich. Das gilt ebenso für alle weiteren Reflektionen. Der Hörer stellt fest: Es gibt einige Positionen, an denen man zu wenig und andere, an denen man zuviel hört.

Die Originalschallfelder überlagern sich mit denen der Reflektionen und addieren sich durch die Deckungsgleichheit. Das klangliche Ergebnis umfaßt die ganze Spanne vom dumpfmulmigen Klang über scheinbar schlechtes Impulsverhalten des Lautsprechers bis hin zur dröhnenden Baßwiedergabe. Diese Stehwellen werden auch als Raumresonanzfrequenzen

bezeichnet – ein Ausdruck, der den Sachverhalt recht gut trifft. Die Resonanzfrequenz ist die Frequenz, bei der ein schwingungsfähiges Gebilde mit größter Amplitude (Auslenkung) schwingt, weil Trägheits- und Rückstellkräfte gleich groß sind. Bei Raumresonanzen muß man berücksichtigen, daß es nicht überall dröhnt, sondern nur an manchen Stellen im Raum, nach Murphy's 1. Gesetz der Akustik allerdings immer genau da, wo man am liebsten sitzt.

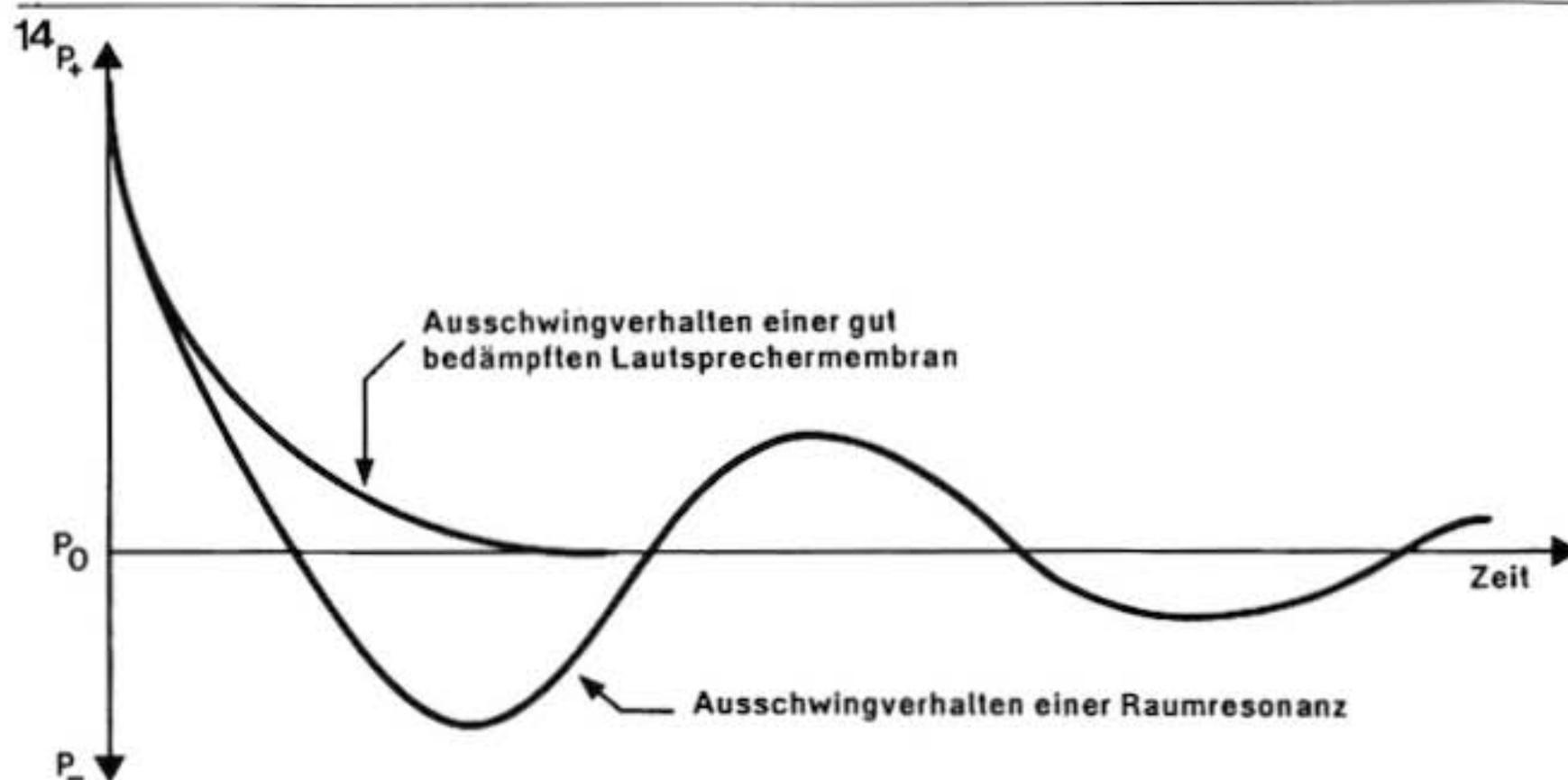
Raumresonanzen

Bevor die Raumresonanzen näher untersucht werden, ist an dieser Stelle ist ein kritisches Wort an manche Werbeabteilungen und leider auch an sehr viele Lautsprecher-Selbstbauer angebracht. Das Ausschwingverhalten des Lautsprechers bei der Resonanzfrequenz des Tieftonchassis wird oft zum Maß aller Dinge, wenn es darum geht, die Baßwiedergabe der Box zu umschreiben. Der Begriff Güte (abgekürzt Q vom englischen Wort Quality), der das Ausschwingverhalten und den Schalldruck eines Lautsprecherchassis bei der Resonanzfrequenz beschreibt, motiviert Kaufentscheidungen bei Boxen und einzelnen Chassis. Er ist daneben oft eine entscheidende Größe für die Planung und Konstruktion von Selbstbau-boxen. Es ist zweifellos zu begrüßen, wenn eine Lautsprecherbox bei ihrer Resonanzfrequenz ein möglichst kurzes und sauberes

Ausschwingverhalten an den Tag legt. Güte-werte zwischen 0,5 und 0,7 versprechen das (theoretisch). Aber es wäre ebenso begrüßenswert, die Raumresonanzen in der Nachbarschaft der Lautsprecherresonanz zu berücksichtigen. Hier finden sich in normalen Räumen Resonanzen mit Gütewerten von 5 bis 10, die aber totgeschwiegen werden. Was nützt eine Lautsprecherbox, die mit hervorragendem Ausschwing- und Impulsverhalten einen Impuls sauber nach dem anderen reproduziert, wenn der Raum immer noch mit dem ersten Impuls beschäftigt ist? Wie so etwas aussehen kann, zeigt das Diagramm in Bild 1.14.

Um bei einem Lautsprecher ein günstiges Ausschwingverhalten zu erzielen, genügt es, die Membranbewegung mittels des vorhandenen Magneten per Kurzschluß der Schwingspule (Gegeninduktion) zu bremsen. Mehr über diese elektrische Bremse und ihre Unzulänglichkeiten (direkt gebremst wird ja nur die Schwingspule, nicht die Membran, die den Schall erzeugt) später. Im Moment nur der

Bild 1.14. Ausschwingverhalten einer Lautsprechermembran, das konstruktiv optimiert wurde. Das Ausschwingverhalten von Raumresonanzen ist konstruktiv leider nicht so einfach zu beherrschen.



86902-1.14.

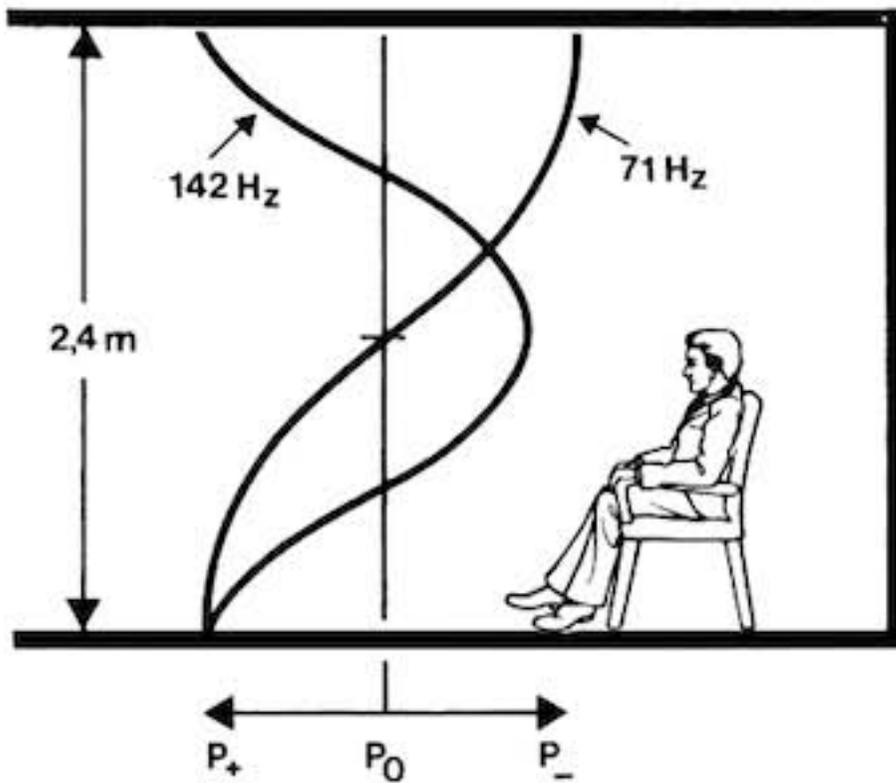


Bild 1.15. Bei 1,20 m Ohr- und 2,40 m Raumhöhe befinden sich Druck- bzw. Schnellmaxima bei 71 Hz bzw. bei 142 Hz auf Ohrhöhe. Von der tiefen Frequenz (71 Hz) ist dann nicht mehr viel zu hören. Dagegen kann ein Ton von etwa 140 Hz deutlich zu laut empfunden werden.

Kommentar: Wenn Werbeabteilungen, Fachzeitschriften und Verkäufer etwas zum Ausschwingverhalten sagen, sollten sie auch von den Raumresonanzen reden. Vor allen Dingen auch davon, wie man sie bremst. Wie bekommt man denn nun die Raumresonanzen in den Griff? Das Vorgehen ist einfach, aber es erfordert etwas Phantasie. Zuerst sollte man sich ein Bild von allen denkbaren Raumresonanzen machen und anschließend den Datenverarbeiter Gehör um Stellungnahme bitten. Um sich ein Bild von allen Raumresonanzen machen zu können, werden diese einfach einmal berechnet. Die Berechnungen beziehen sich hier auf rechteckige Räume, in denen Resonanzen zwischen allen 6 parallelen Wänden auftreten (vier Wände, Fußboden und Zimmerdecke). Ist der Wohnraum L-förmig oder hat er eine Dachschräge, dann sind bereits dadurch einige Probleme bei der Baßwiedergabe gelöst. Bei L-förmigen Räumen einfach deshalb, weil diese meist groß sind. In abgechrägten Räumen treten vertikale Resonanzen erst gar nicht auf. Das heißt, anders als bei einer üblichen Deckenhöhe von 2,4 m sind hier, auch wenn Sie auf dem Sofa sitzen, die Frequenzen um 70 Hz gut hörbar.

Wenn Decke und Boden parallel zueinander sind, muß das nicht immer der Fall sein, da Sie sich hier im Druckminimum P_0 der ersten vertikalen Resonanz befinden. Rechteckige Räume sind eindeutig in der Mehrheit, wir beginnen deshalb mit der Berechnung der Resonanzen in allen drei Achsen. Bei anders geformten Räumen rechnen Sie mit entsprechend weniger Achsen.

Die Grundlage aller Berechnungen bilden dabei die Entfernungen l_x , l_y und l_z zwischen allen Wänden des Abhörtraumes und die folgende Gleichung:

$$F_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{nx}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{ny}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{nz}{l_z}\right)^2}$$

l_x , l_y , l_z = Abstand der Wände in Meter

c = Schallgeschwindigkeit der Luft 344 m/s bei 21 Grad

nx , ny , nz = Integer (ganze Zahlen 1, 2, 3...siehe Text)

Es errechnen sich hier leicht eine ganze Reihe einzelner Raumresonanzen, wenn Sie für n nacheinander die Werte 0, 1, 2, 3, 4 einsetzen. Dabei gilt folgende Reihe:

$$nx = 1, ny = 0, nz = 0$$

$$nx = 2, ny = 0, nz = 0$$

$$nx = 3, ny = 0, nz = 0$$

$$nx = 4, ny = 0, nz = 0$$

$$nx = 0, ny = 1, nz = 0$$

$$nx = 0, ny = 2, nz = 0$$

$$nx = 0, ny = 3, nz = 0$$

usw.

Die ganzen Zahlen nx , ny und nz bezeichnen dabei die Schwingungsknoten. Das sind die Punkte, an denen besonders wenig zu hören ist. Für eine noch größere Genauigkeit können Sie mit n bis 9 rechnen. Wenn dafür ein programmierbarer Taschenrechner oder ein Heimcomputer zur Verfügung steht, dann ist die Rechnerei kein Problem mehr. Das folgende BASIC-Programm gibt eine Tabelle für alle möglichen Raumresonanzen aus. Zum Programm nur soviel: Es berechnet zunächst die Schwingungsknoten von 0 bis 4 und fragt dann nach, ob es sie auch für die Werte 5 bis 9 berechnen soll. Wer auf diese Möglichkeiten verzichtet, entfernt die entsprechenden Programmzeilen und ändert die Zeile 140 auf DIM F(4,4,4).

```

10 REM -----
20 REM PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DER RESONANZFREQUENZEN EINES RECHT-
30 REM WINKLIGEN RAUMES. EINHEITEN: LÄNGEN IN METERN; FREQUENZEN
40 REM IN HERTZ.
50 REM -----
60 REM
70 PRINT "Bitte LÄNGE des Raumes in Metern eingeben"
80 INPUT L
90 PRINT "Bitte BREITE des Raumes in Metern eingeben"
100 INPUT B
110 PRINT "Bitte HÖHE des Raumes in Metern eingeben"
120 INPUT H
130 CHALBE = 344/2.
140 DIM F(9,9,9)
150 I = 0
160 FOR NZ = 0 TO 4
170 PRINT "-----"
180 PRINT " NX      NY      NZ              F
190 PRINT "-----"
200 FOR NY = 0 TO 4
210 FOR NX = 0 TO 4
220 IF (NX=0 AND NY=0 AND NZ=0) GOTO 260
230 F(NX,NY,NZ) = SQR( (NX/L)^2 + (NY/B)^2 + (NZ/H)^2 ) * CHALBE
240 I=I+1: IF I>17 THEN GOTO 470
250 PRINT NX;"      ";NY;"      ";NZ;"      ";F(NX,NY,NZ)
260 NEXT NX
270 NEXT NY
280 NEXT NZ
290 I=0
300 PRINT "Werden weitere Frequenzen gewünscht (bis n = 9)? (J/N)"
310 INPUT B$
320 IF B$ = "N" THEN GOTO 450
330 FOR NZ = 5 TO 9
340 PRINT "-----"
350 PRINT " NX      NY      NZ              F
360 PRINT "-----"
370 FOR NY = 0 TO 9
380 FOR NX = 0 TO 9
390 F(NX,NY,NZ) = SQR( (NX/L)^2 + (NY/B)^2 + (NZ/H)^2 ) * CHALBE
400 I=I+1: IF I>17 THEN GOTO 510
410 PRINT NX;"      ";NY;"      ";NZ;"      ";F(NX,NY,NZ)
420 NEXT NX
430 NEXT NY
440 NEXT NZ
450 PRINT "Auf Wiedersehen"
460 END
470 PRINT "WEITER ? Dann irgendeine Taste und RETURN drücken"
480 INPUT B$
490 I = 0
500 GOTO 250
510 PRINT "WEITER ? Dann irgendeine Taste und RETURN drücken"
520 INPUT B$
530 I = 0
540 GOTO 420
550 END

```

Im Bild 1.16 sind die Druckknoten und Raumresonanzen für $n = 1$ und $n = 2$ dargestellt. Wenn für die längste Strecke $n = 1$ und für alle anderen Strecken $n = 0$ eingesetzt wird, dann erhalten Sie die unterste Raumresonanzfrequenz. Das ist die Frequenz, von der fälschlicherweise noch immer sehr viele Leute annehmen, es sei die tiefste Frequenz, die überhaupt in einem solchen Raum reprodu-

zierbar sei. Wie sich bereits gezeigt hat, stimmt das nicht. Aber es ist die unterste Frequenz, bei der das Wellenmodell noch halbwegs anwendbar ist. Sie kann daher auf jeden Fall von einem Lautsprecher in den Raum abgestrahlt werden (wie laut, ist eine Frage der Lautsprecherbox). Um den Raum als Druckkammer zu nutzen, ist ein elektronischer Kniff nötig – dazu später mehr.

Wer jetzt etwas rechnet, stellt vermutlich verwundert fest, daß selbst in kleinen Räumen etwa um die 100 Resonanzen allein im Bereich unter 200 Hz auftreten können. Das jedoch hört sich schlimmer an, als es in Wirklichkeit ist.

Die Zahl aller Resonanzen von 0 Hz bis zu einer bestimmten Frequenz f errechnet sich nach folgender Formel:

$$N_f = \frac{4\pi}{3} \cdot V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \cdot \frac{f}{c}$$

V = Raumvolumen $l_x \cdot l_y \cdot l_z$

S = Wandfläche $2(l_x \cdot l_y + l_x \cdot l_z + l_y \cdot l_z)$

L = $4(l_x + l_y + l_z)$

c = Schallgeschwindigkeit 344 m/s

π = 3,1415 (Kreiszahl)

Für diese Rechnung genügt ein BASIC-Programm mit relativ wenigen Programmzeilen.

Jede Vergrößerung des Raumvolumens hat auch eine größere Zahl Raumresonanzen für

```

10 REM -----
20 REM DIESES PROGRAMM BERECHNET DIE ANZAHL DER EIGENFREQUENZEN
30 REM ZWISCHEN 0 UND DER GRENZFREQUENZ F.
40 REM -----
50 REM
60 PRINT "Bitte LÄNGE des Raumes in Metern eingeben"
70 INPUT L
80 PRINT "Bitte BREITE des Raumes in Metern eingeben"
90 INPUT B
100 PRINT "Bitte HÖHE des Raumes in Metern eingeben"
110 INPUT H
120 V = L*B*H
130 S = 2*(L*B + L*H + B*H)
140 L = 4*(L + B + H)
150 C = 344
160 PI = 3.1415927
170 PRINT "Bitte GRENZFREQUENZ F eingeben"
180 INPUT F
190 N = 4*PI/3*V*(F/C)^3 + PI/4*S*(F/C)^2 + L/B*F/C
200 PRINT "Die Anzahl der Eigenfrequenzen zwischen 0 und";F;"beträgt";
210 PRINT INT(N)
220 PRINT "Nochmal ? (J/N)"
230 INPUT B$
240 IF B$ = "J" THEN GOTO 170
250 END

```

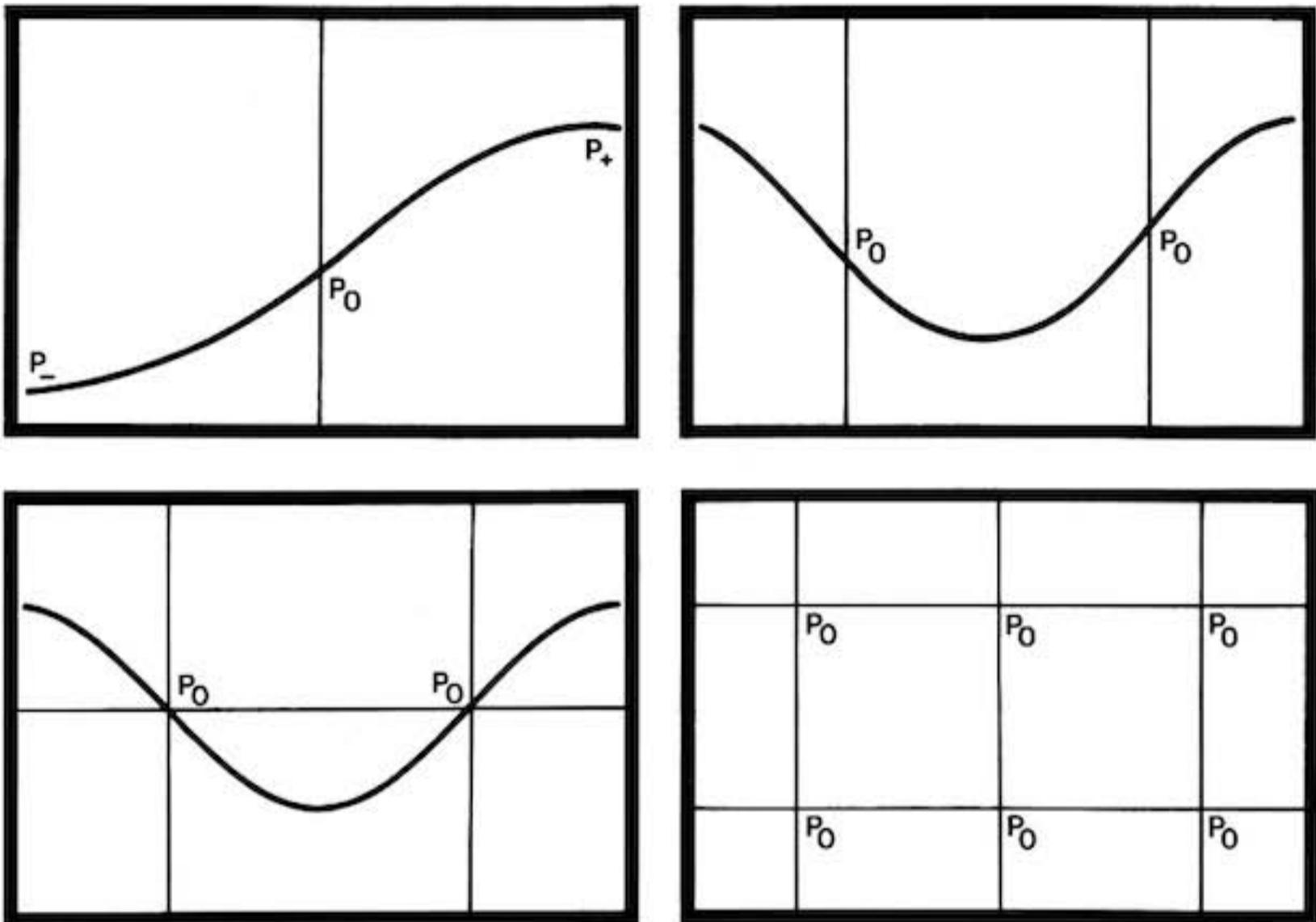


Bild 1.16. Raumresonanzen in einem Rechteckraum. Die Linien bzw. deren Schnittstellen bezeichnen die Positionen der Schnellemaxima (zu leise Wiedergabe der entsprechenden Frequenzen).

einen bestimmten Frequenzbereich zur Folge. Ein Raum mit 3000 Kubikmeter Volumen hat bei jeder Frequenz 50 mal mehr Resonanzen als ein Raum mit 60 Kubikmetern.

Sehr große Räume klingen aber im Baßbereich meist besser als kleinere Räume. Sollten mehr Resonanzen eher besser sein? Eine berechtigte Frage (die unser Gehör so beantworten würde, wenn es sprechen könnte): Im Prinzip ja, aber die Verteilung der Raumresonanzen über den Frequenzbereich ist mindestens ebenso wichtig. Aus meiner Tätigkeit als Datenverarbeiter weiß ich, daß die Zahl der Raumresonanzen bei höheren Frequenzen im Quadrat zur Frequenz ansteigt. Rechnerisch ausgedrückt heißt das:

$$\frac{\delta N_f}{\delta f} = \frac{4\pi \cdot V \cdot f^2}{c^3}$$

(Das Ergebnis der Rechnung gibt die Anzahl der Frequenzen an, die in einem hypothetisch kleinen Intervall um f liegen.)

Es wäre schön, wenn sich diese Gesetzmäßigkeit auch auf tiefere Frequenzen übertragen ließe. Das heißt, wenn Sie die Ergebnisse der Berechnung, nach Terzbändern (1/3 Oktaven) sortiert, in ein Diagramm eintragen, dann sollte jedes (!) höherfrequente Terzband mehr Resonanzen enthalten, als das vorangehende. Ein Beispiel hierfür zeigen die Diagramme in Bild 1.17.

Das Ohr weiter: Ich akzeptiere höchstens gleich viele Resonanzen, man ist ja kompromißbereit. Auf keinen Fall akzeptiere ich zwei gleiche Resonanzfrequenzen in Frequenzbändern mit nicht mindestens insgesamt 5 Resonanzen. Ansonsten können klangverschlechternde Folgen auftreten.

Um einen grafischen Überblick über die Situation in Ihrem Wohnraum zu erhalten, können Sie alle berechneten Resonanzen auch in ein Diagramm nach Bild 1.18 eintragen.

Tragen Sie in das Diagramm die errechneten Punkte entsprechend ein. Auf der vertikalen Achse ist die Anzahl der Raumresonanzen aufgetragen, auf der horizontalen die der Fre-

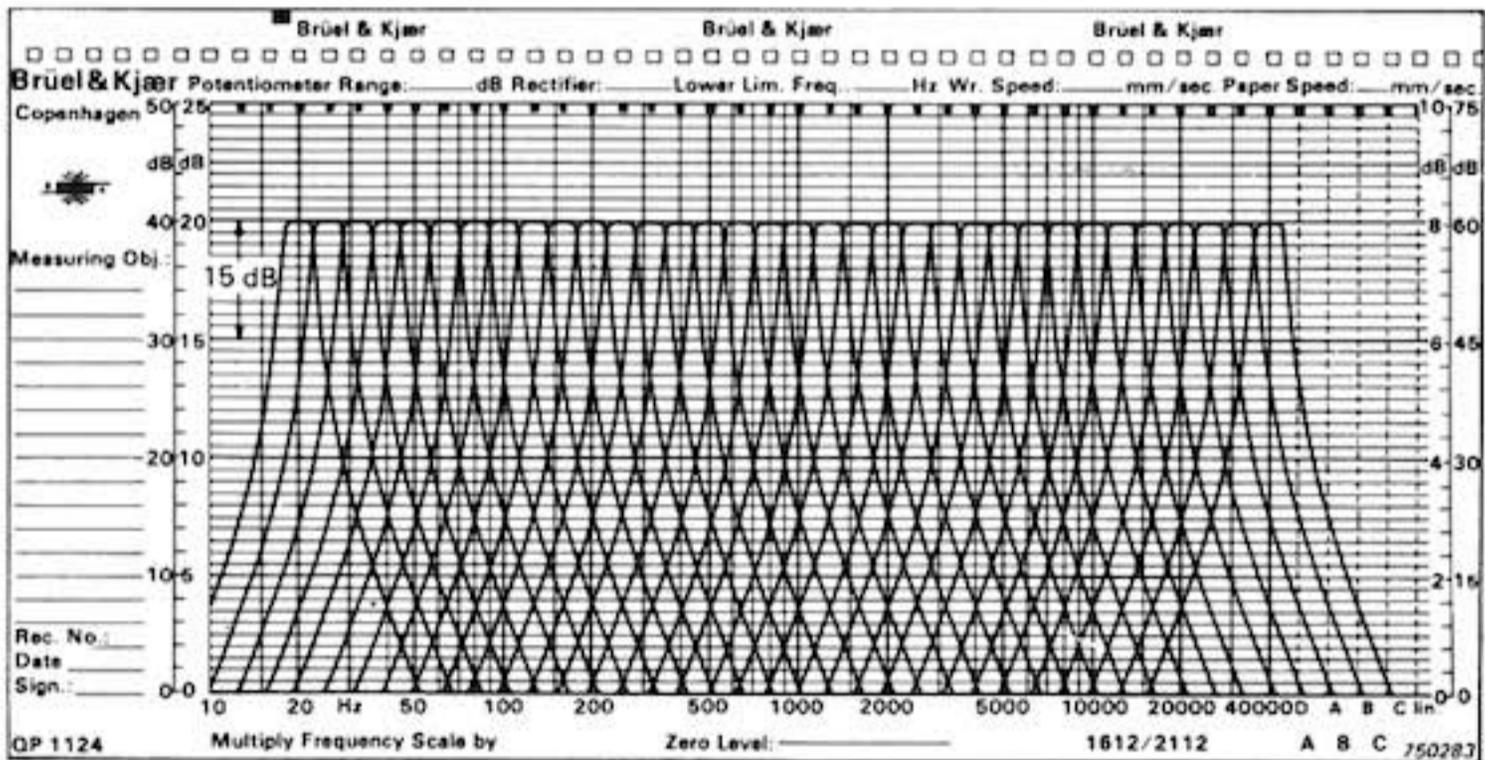
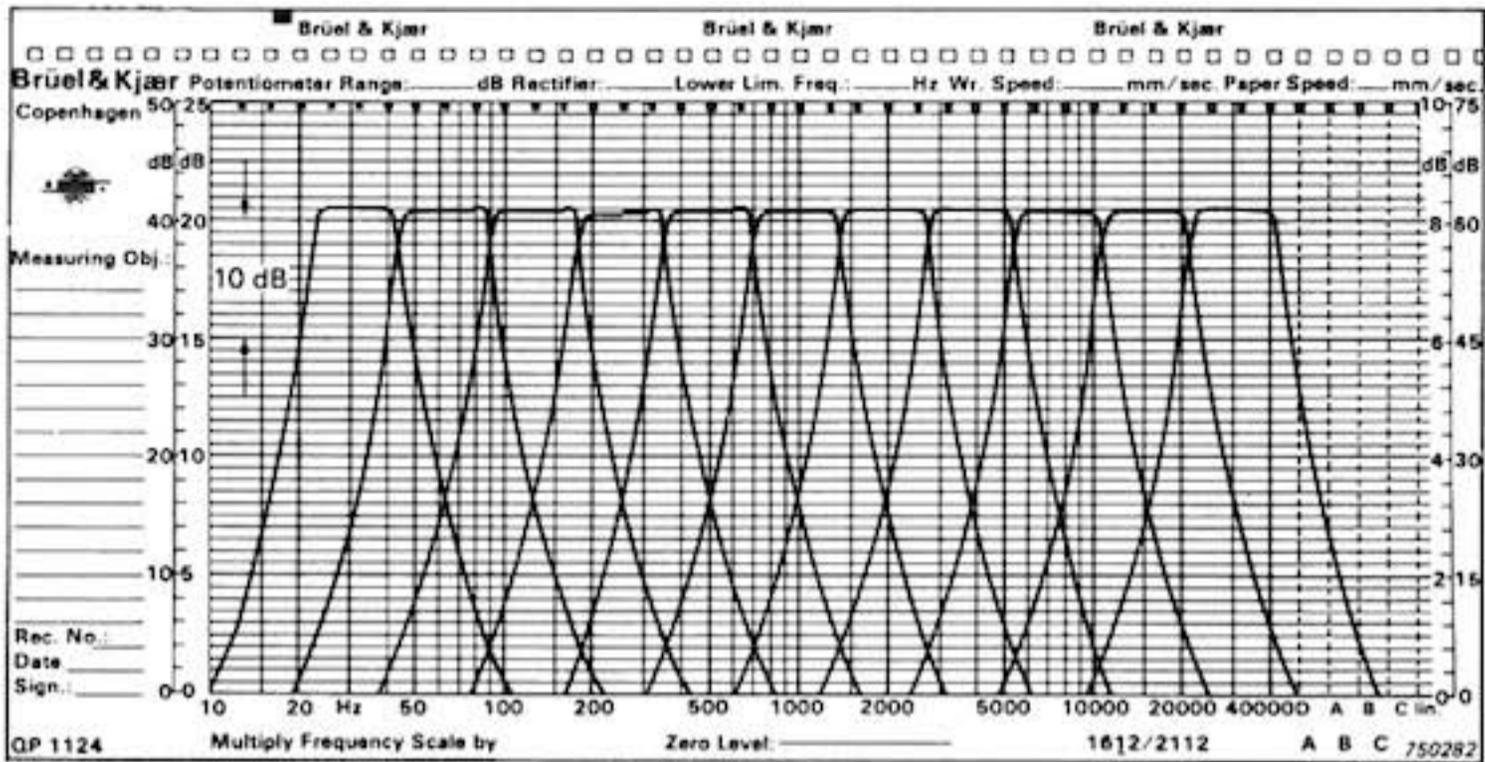


Bild 1.17. Aufteilung des Audio-Bereiches in Oktav- und Terzbänder.

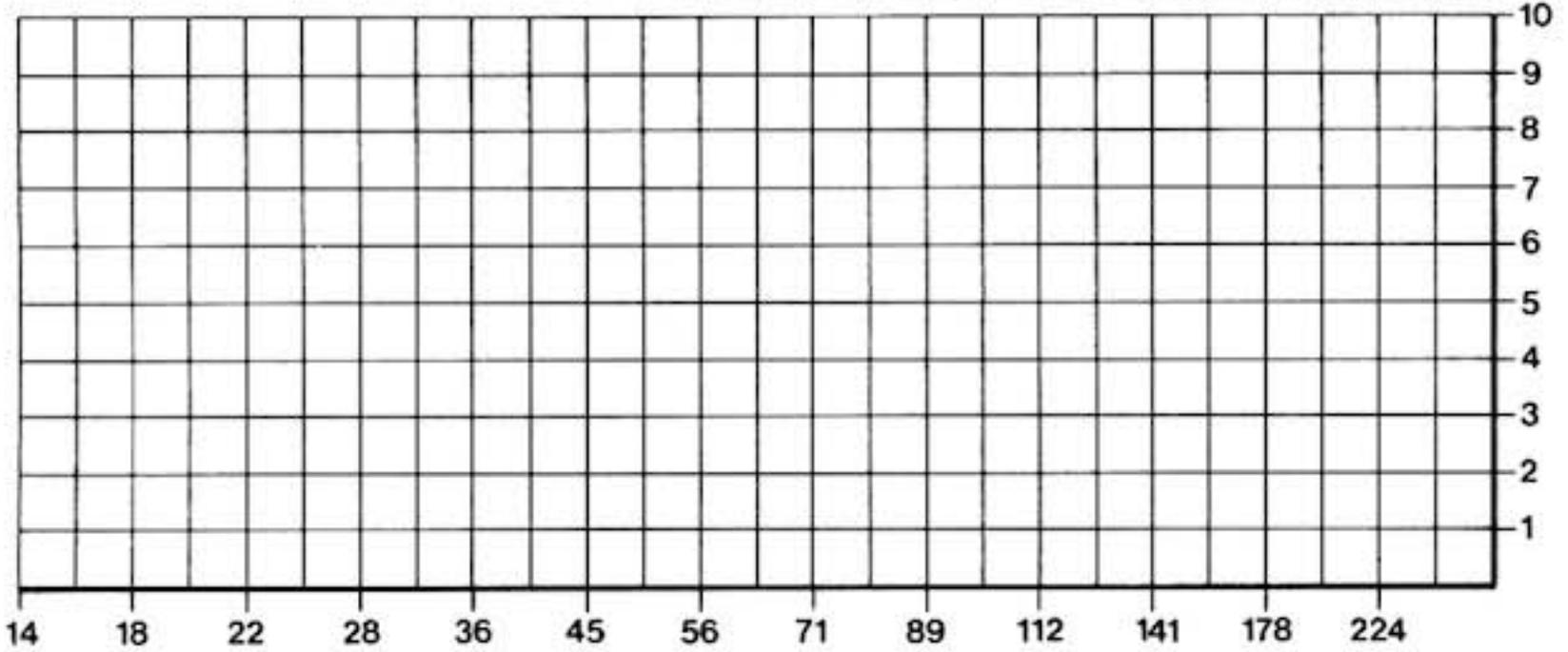
quenzen. Wenn alle Punkte eingetragen sind, werden sie miteinander verbunden und es entsteht eine Kurve. Steigt die Kurve mit höheren Frequenzen an, wie in Bild 1.18 das Beispiel von Raum 1, ist das Ergebnis gut. Von Raum 2 läßt sich das nicht behaupten. Die Kurve sollte nie abfallen, höchstens parallel zur Frequenzachse verlaufen.

Wenn Sie die Berechnungen abgeschlossen und in die Grafik übertragen haben, dann sehen Sie, ob der Architekt ein Händchen für Akustik gehabt hat. Gehabt, das ist hier der springende Punkt. Ist das nämlich nicht der

Fall, beginnt jetzt der Ärger. Für jedes Raumvolumen gibt es nur wenige akustisch optimale Abmessungen (z.B. 1 : 1,25 : 1,6 für 60 Kubikmeter und 1 : 1,45 : 3,27 für 4850 Kubikmeter). Es ist sehr wahrscheinlich, daß diese

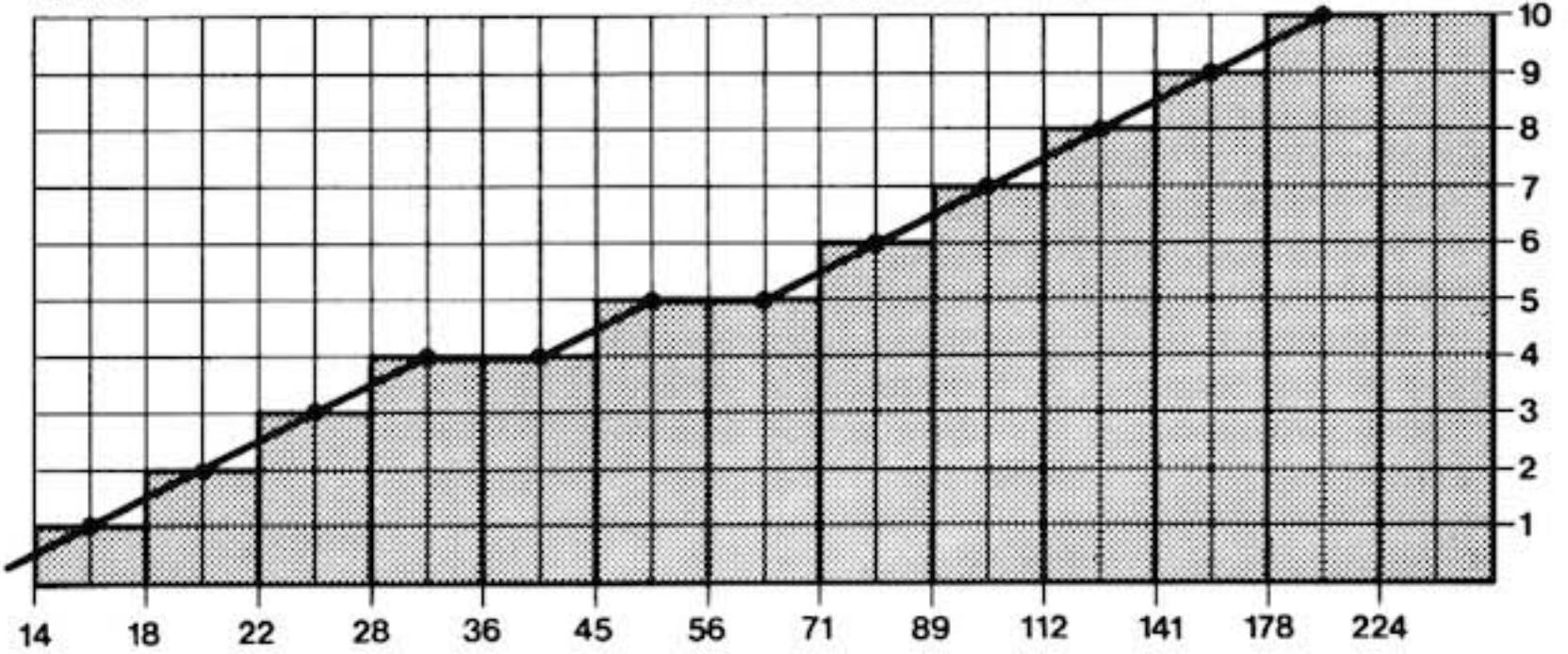
Bild 1.18. Mit diesem Diagramm kann man die Raumakustik optisch darstellen. Auf der senkrechten Achse ist die Anzahl der Raumresonanzen aufgetragen und auf der waagerechten Achse die Frequenzen. Die akustischen Eigenschaften von Raum 1 sind wesentlich besser als die von Raum 2.

Zahl der Raumresonanzfrequenzen pro Terz (1/3 Oktave)



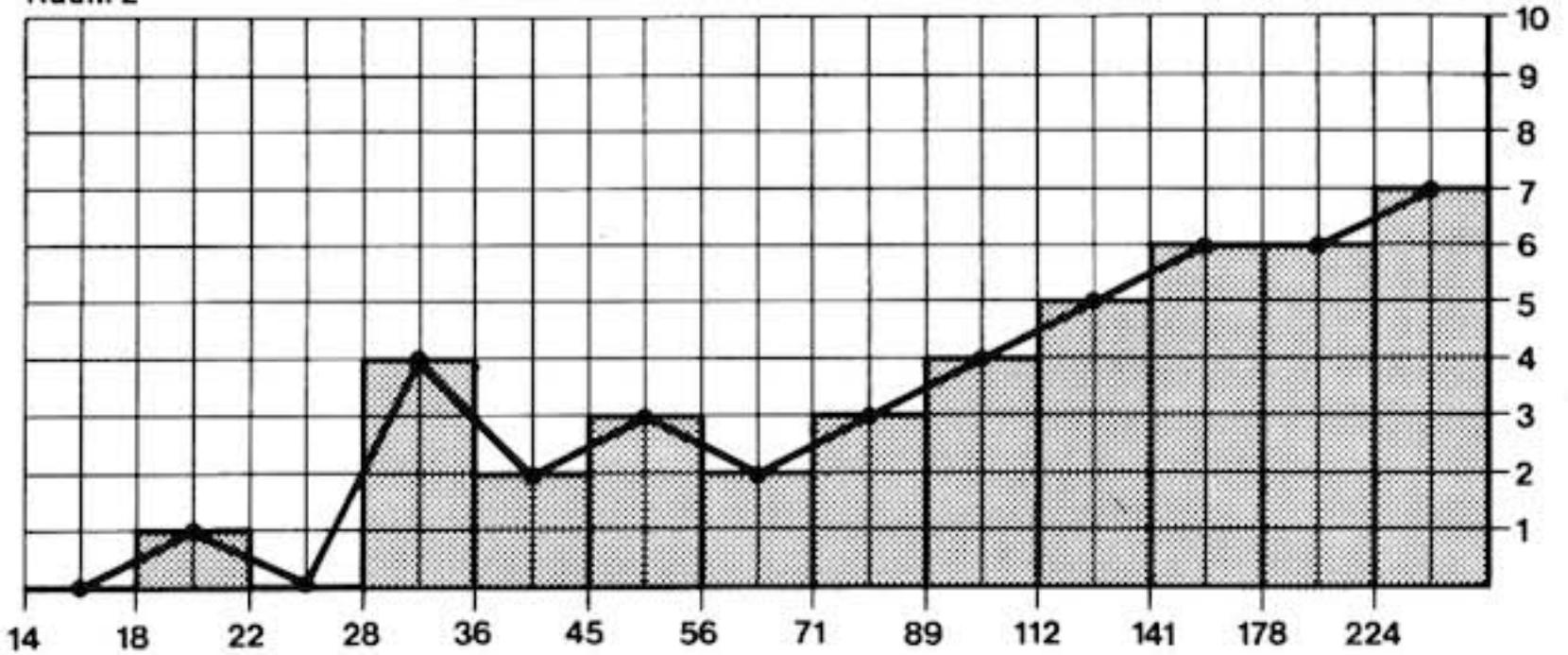
Raum 1

Zahl der Raumresonanzfrequenzen pro Terz (1/3 Oktave)



Raum 2

Zahl der Raumresonanzfrequenzen pro Terz (1/3 Oktave)



Verhältnisse für Ihren Wohnraum nicht zutreffen und damit der Ärger beginnt. Weiterhin ist jetzt klar, warum Räume mit Dachschrägen nicht unbedingt bessere Baßwiedergabe ermöglichen, denn die geringere Zahl der Resonanzen (durch weniger parallele Wände) kann hier auch nachteilig sein. Aber mit der Grafik steht ein Werkzeug zur Verfügung, um die Größe des Schadens zu ermitteln und so korrigierend einzugreifen. Es sind ja nur die Resonanzen zu bedämpfen, die sich störend auf die Kurve auswirken und sie verbiegt. Es ist also völlig überflüssig, den ganzen Raum umzubauen oder alle Wände mit absorbierenden Platten zu bekleiden. Das sieht man leider oft in Hifi-Studios oder Räumen für Hörtests! Ein derartiges Vorgehen verfälscht höchstens den Höreindruck einer Box gegenüber dem Klang in guten normalen Räumen, da diese Absorber viel zu viele Resonanzen verschlucken. Die Wiedergabe der Boxen verliert an Lebendigkeit.

Noch einmal: es genügt, die Raumresonanzen zu bedämpfen, die das Gehör als störend empfindet. Dafür genügen in den meisten Fällen kleine akustische Absorber; für die folgt noch eine genaue Bauanleitung. Geeignet ist hierfür auch ein Equalizer. Darauf gehen wir auch noch genauer ein, denn was im Fachgeschäft als Equalizer zur Verbesserung der Raumakustik angeboten wird, ist hierfür nun völlig ungeeignet. Ebenso können Sie über die Aufstellung der Boxen in das Resonanzgeschehen eingreifen, allerdings nicht so freizügig wie mit Absorbern oder Equalizern. Es ist, wie sich noch zeigen wird, auch möglich, daß trotz verringerter störender Resonanzen die Baßwiedergabe schlechter wird. Der letzte Punkt, der immer berücksichtigt werden muß, wenn über Korrekturen der Raumakustik nachgedacht wird, ist die Hörplatzposition im Raum. Diese entscheidet darüber, ob Sie im Druckmaximum/Minimum einer Resonanzfrequenz oder irgendwo dazwischen sitzen. Wenn Sie im Druckmaximum einer Raumresonanz sitzen, dann ist deren störender Einfluß sehr groß. Druckmaxima befinden sich bekanntlich in Abständen von 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 usw. Wellenlängen von einer Wand.

Die Überlegungen dieser kleinen Berechnungen betrifft natürlich auch die Entwicklung von Lautsprecherboxen. Deren Gehäuse sind, meist aus Kostengründen, ebenfalls rechteckige Gebilde mit einer ganzen Reihe von Eigen-

resonanzen. Was für die Raumakustik gilt, trifft auch hier zu. Insbesondere gilt, daß bei den sogenannten Baßreflexboxen nur sehr wenig absorbierender Dämmstoff im Gehäuse untergebracht sein darf.

Da der Wohnraum natürlich nicht wie eine Lautsprecherbox mit Dämmstoffen aufgefüllt sein kann, benötigt man, um die Baßwiedergabe zu verbessern, die passenden Absorber, Equalizer und/oder andere Elektronik. Außerdem auch noch einige weitere Informationen über diese störenden Raumresonanzen.

Schalleistung, Schalldruck, Schallpegel, Schallenergie und Raumabsorption

Befassen wir uns ein wenig mit der Funktion der Absorber. Sie passen recht gut in die Betrachtungen zum Thema Luft/Raum-Kombinationen, da man an ihnen auch die Begriffe Absorption und Nachhallzeit sowie deren Einfluß auf die Raumresonanzen recht gut erklären kann.

Wird eine Schallquelle, die in einem Raum (oder Lautsprechergehäuse) Schalldruck erzeugt, plötzlich abgeschaltet, baut sich die Schallenergie im Raum mehr oder weniger langsam ab. Dieser Vorgang läßt sich mathematisch so beschreiben:

$$P_n = \frac{K}{k_n} \cdot e^{-k_n t} \cdot \cos \omega_n t$$

K = Konstante für Leistung, Position der Schallquelle und Raumvolumen

k_n = Dämpfungskonstante der Raumabsorption

n = Kreisfrequenz

Je größer die Dämpfungskonstante k_n ist, um so schneller baut sich die Schallenergie im Raum ab (sie wird restlos in Wärme umgesetzt). Der exponentielle Verlauf der Kurve (wie ihn Bild 1.19 gemäß der Gleichung zeigt) bleibt immer erhalten.

Die Nachhallzeit ist definiert als die Zeitspanne, die vergeht, bis die Schallenergie im Raum auf 1/1000000 des ursprünglichen Wertes reduziert ist. Das ist der Punkt, bei dem Schalldruckpegel um 60 dB gesunken ist. Daher stammt die Bezeichnung der Nachhallzeit mit T_{-60dB} . (Der Begriff Pegel soll Sie hier nicht irritieren. Immer wenn von dBs die Rede ist, ist auch irgendwo ein Pegel in der Nähe. Gegenü-

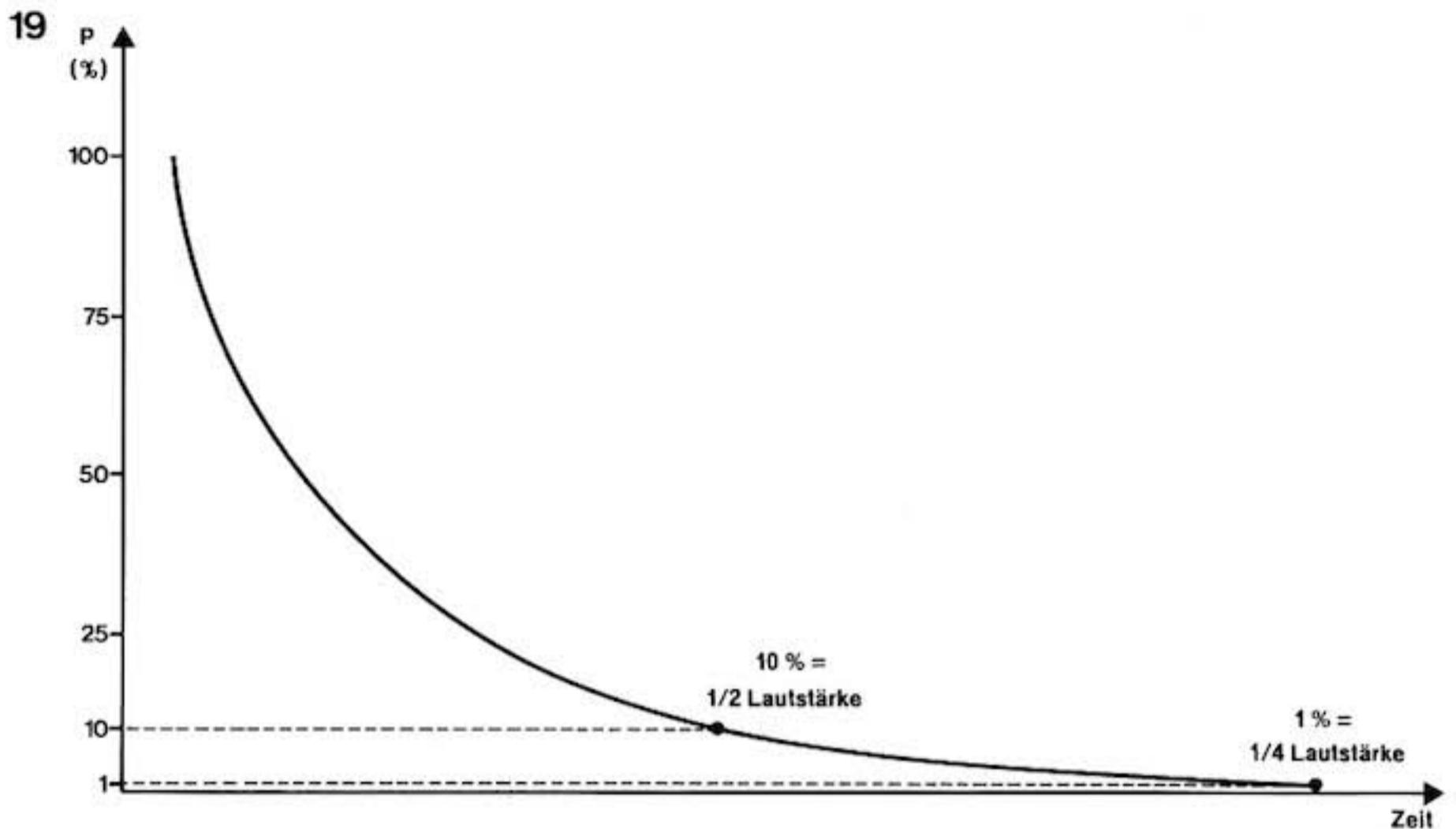


Bild 1.19. Die beiden Diagramme zeigen, wie sich der Schalldruck in einer bestimmten Zeit abbaut. Dabei ist die Skala für den Schalldruck linear eingeteilt. Das Gehör bewertet den Verlauf der Kurve nicht linear, sondern logarithmisch, womit sich der Abklingvorgang sehr viel langsamer darstellt.

ber absoluten Werten, wie Schalldruck in N/qm , bezeichnet ein Pegel immer ein Verhältnis zweier Größen, wobei der Nullpunkt frei gewählt werden kann. So sind z.B. 0 dB $2 \cdot 10^{-5} N/qm$. Dazu aber später noch mehr.) Die Nachhallzeit steht mit der Dämpfungskonstanten k_n in folgender Beziehung:

$$T_{-60 \text{ dB}} = \frac{6,91}{k_n}$$

Bei einer Nachhallzeit von 0,5 Sekunden hat k_n also einen Wert von 13,82.

Jede Änderung der Dämpfungskonstante (Raumabsorption), z.B. mit einem zusätzlichen Absorber, ändert daher sofort auch die Nachhallzeit. Dummerweise ändert sich die Nachhallzeit jedoch nicht so, wie es sich aus den bekannten Gleichungen für Raumvolumen, Oberfläche und Absorption der Oberflä-

che errechnet. Daher verzichten wir an dieser Stelle auf eine Berechnung. Hier hilft nur messen. Dazu ist allerdings ein Nachhall-Meßgerät erforderlich, das man sich entweder ausleihen oder bauen muß. Die Kosten für solche wirklich wichtigen Meßgeräte sind bei Fertiggeräten leider so hoch, so daß der Selbstbau solcher Geräte interessant wird. Es ist deshalb zu überlegen, sich mit Gleichgesinnten zusammenzuschließen und über Teamwork nachzudenken. Das senkt die (Un)Kosten für diese selten mehrmals benötigten Geräte erheblich. Ein Beispiel zum Thema Berechnung oder Messung von Nachhallzeiten:

Üblicherweise wird zur Berechnung der Nachhallzeit eines Raumes das Volumen V (in Kubikmetern) und die totale Absorption A (in qm) herangezogen. Diese totale Absorption ist eine Fläche, die sich aus der prozentualen Absorption aller Oberflächen des Raumes ergibt. Haben z.B. 100 qm Gesamtfläche (Wände, Decke, Fußboden) gleichmäßig 10 % Absorption pro qm , so ergibt das 10 qm mit 100 % pro qm Absorption. Über die gängige Gleichung

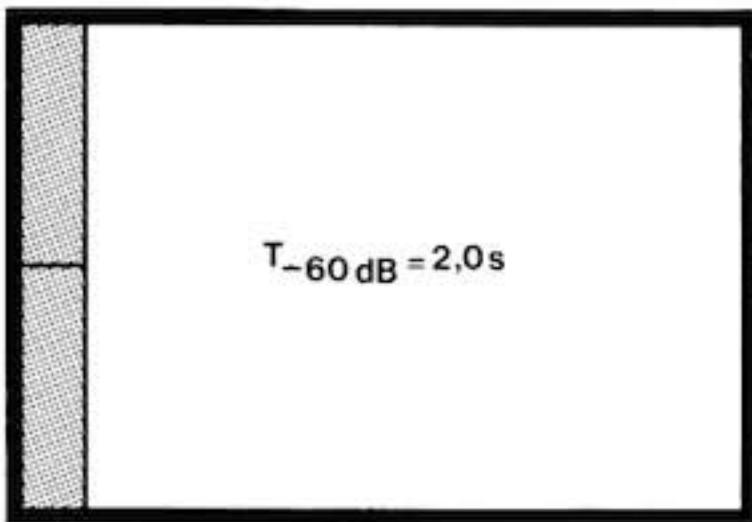
$$T_{-60 \text{ dB}} = 0,16 V/A$$

läßt sich dann die Nachhallzeit ermitteln. Übrigens: Die Gleichung ist sehr vereinfacht. Das ist aber nicht so schlimm – der eigentliche Ärger liegt woanders. Die Lage aller absorbieren-

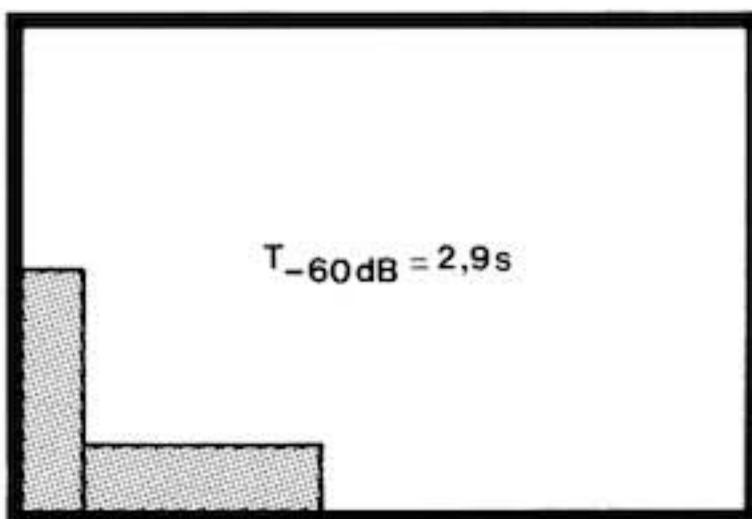
den Flächen zueinander bestimmt deren tatsächliche Absorption. Die Werte, die in Tabellen für die verschiedensten Materialien angegeben sind, geben immer nur die maximale Absorption an. Bereits bei Berechnungen im zweidimensionalen Raum zeigten sich Unterschiede von 45 %, wie in der Zeichnung (Bild 1.20) zu sehen ist.

Es gibt genauere Berechnungsmethoden. Das ist nicht zuletzt eine Folge teurer Fehler bei der Berechnung von Konzertsälen mit der einfacheren Methode. Für den Hausgebrauch ist diese komplexere Berechnung jedoch zu kompliziert. Messen ist hier sehr viel einfacher. Mit der Nachhallzeit und dem Wert für k_n lassen sich jetzt auch einzelne Raumresonanzen berechnen. Über die folgende Gleichung wird der Schalldruckverlauf einer Raumresonanz bestimmt:

20



Raum a



Raum b

86902-1.20.

Bild 1.20. Die gleiche Menge des gleichen Dämmmaterials bewirkt je nach Position völlig unterschiedliche Ergebnisse. Die schallabsorbierende Wirkung ist also entscheidend von der Position des Materials abhängig.

$$P_{n \max} = \frac{2K\omega}{\sqrt{4\omega_n^2 \cdot k_n^2 - (\omega^2 + \omega_n^2)^2}}$$

$\omega_n = 2 \cdot$ Raumresonanzfrequenz

$\omega =$ Anregungsfrequenz

Das Ergebnis sieht ungefähr so aus, wie es Bild 1.21 darstellt.

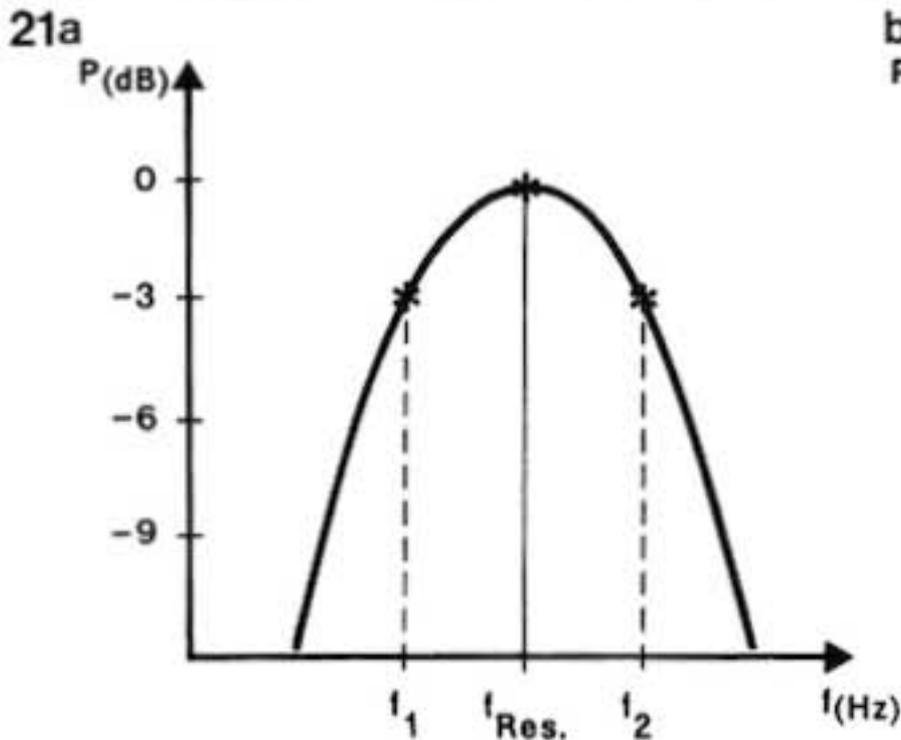
Bei der Resonanzfrequenz hat der Schalldruckpegel seinen Maximalwert. Daneben gibt es zwei Punkte, bei denen der Schalldruckpegel um 3 dB unterhalb des Maximalwertes liegt. Diese Frequenzen sind mit f_1 und f_2 gekennzeichnet. Schon wieder dBs. In der Akustik bedeutet ein Wert von -6 dB nur noch den halben Schalldruck. Bei 3 dB weniger Schalldruck wird nur noch die halbe Schalleistung erzeugt. In der Elektrotechnik sinkt die Spannung bei -3 dB auf den 0,707-fachen Wert ab. Da die Leistung beim Verbraucher vom Quadrat der angelegten Spannung abhängt, wird dabei nur noch die halbe Leistung abgegeben. Die 3-dB-Werte sind Eckpunkte für 50 % Leistung und in der Akustik häufig zu finden. Zurück zu den beiden Frequenzen f_1 und f_2 . Zwischen ihnen gilt folgende, für den Hifi-Fan wichtige Beziehung:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{k_n}{\pi} \text{ und } \Delta f = \frac{6,91}{\pi T_{-60 \text{ dB}}}$$

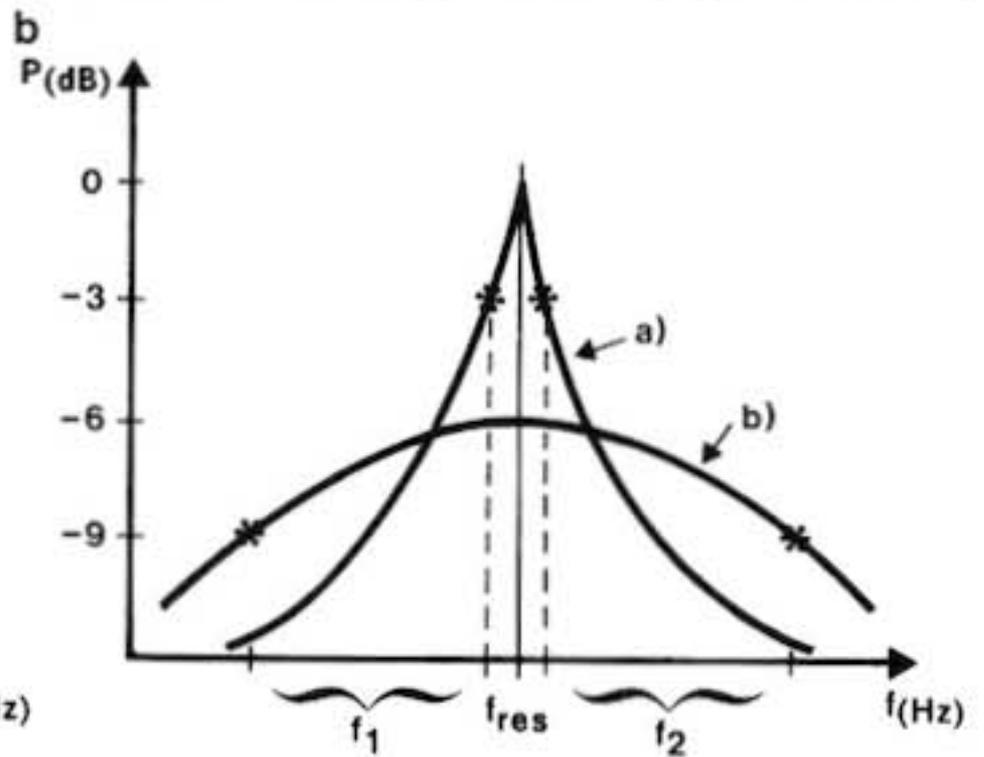
Dieser Wert kennzeichnet die Bandbreite der Raumresonanz.

Bei geringer Bedämpfung durch k_n (lange Nachhallzeit), ist die Bandbreite sehr gering. Fast die gesamte Schallenergie verteilt sich auf ein sehr enges Frequenzband. Je größer die Bedämpfung durch k_n ist, um so breiter wird die Schallenergie in einem Frequenzbereich verteilt. Schließlich kann man nicht mehr so recht von einer Resonanz reden; von Schalldruck allerdings auch nicht mehr.

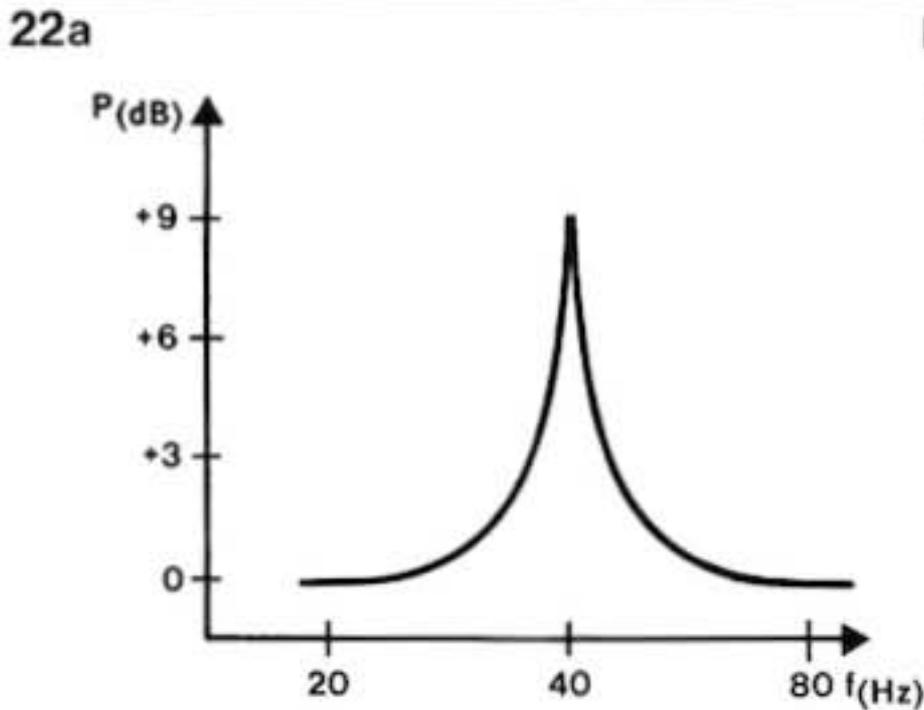
Aus der Bandbreiten-Gleichung für die Raumresonanz geht hervor, daß die Bandbreite bei konstanter Nachhallzeit nur von der Nachhallzeit, nicht aber von der Frequenz abhängt. Das allein ist jedoch noch nicht so interessant. Die Frage ist: Was für eine Bandbreite hat jetzt so eine Resonanz? Ahnen Sie es? Gehört haben Sie es mit Sicherheit schon. Selbst bei sehr kurzen Nachhallzeiten von 0,3...0,5 Sekunden, die für Hifi-Wiedergabe in Wohnräumen sehr gut geeignet sind, bleiben die



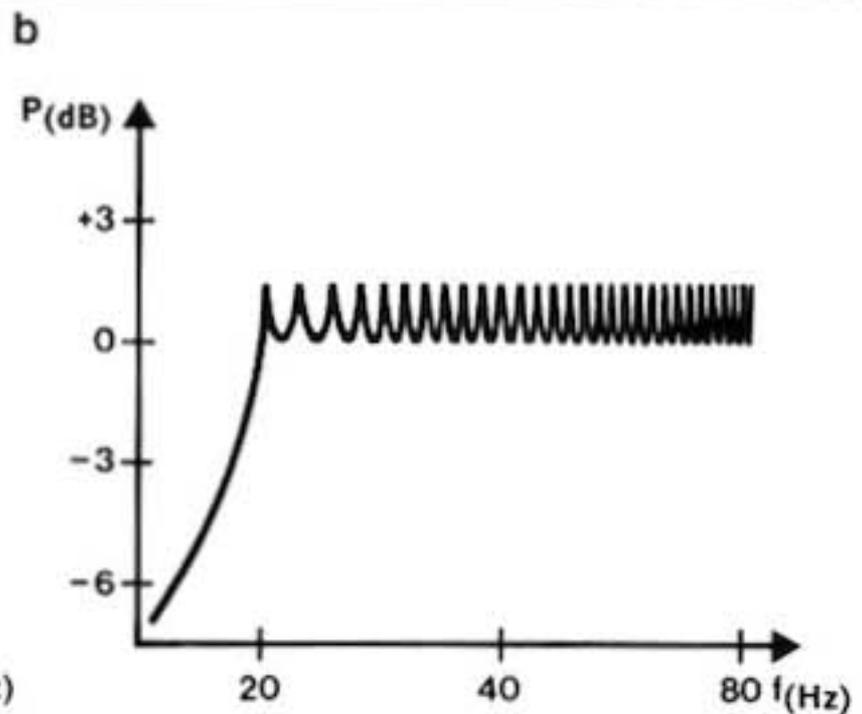
86902-1.21a.



86902-1.21b.



86902-1.22a.



86902-1.22b.

Bandbreiten sehr gering. Für die 0,5 s sind es gerade 4,3 Hz. Grafisch betrachtet sieht das so aus, wie es Bild 1.22a andeutet.

Für größere Räume ist das ein sehr angenehmer Wert. An die drei Resonanzen verschiedener Frequenzen innerhalb einer Terz (1/3 Oktave) stört sich das Gehör nicht mehr. Wenn jedoch bei der Berechnung für tiefe Frequenzen nur eine solche Resonanz auftaucht, dann stört sie mit Sicherheit. Sie sollte dann ebenso bedämpft werden wie zuviel vorhandene Resonanzen in höheren Frequenzbereichen. Jetzt muß dafür jeder Absorber oder Equalizer, den man einsetzt, mit einer Bandbreite von ca. 4,3 Hz aufwarten können. Nur

Bild 1.21. Schalldruckverlauf von Resonanzen verschiedener Bandbreite. Die -3 dB Punkte f_1 und f_2 definieren die Bandbreite der Resonanz. Je geringer die Bandbreite wird, um so größer wird der Peak bei der Resonanzfrequenz. Die Bandbreite der Kurve a) ist relativ gering. Die Frequenzen f_1 und f_2 liegen sehr eng beieinander. Bei Kurve b) ist die Bandbreite sehr groß.

Bild 1.22a und Bild 1.22b. Bei gleichmäßiger Verteilung über das Frequenzband werden auch sehr schmalbandige Resonanzen unhörbar.

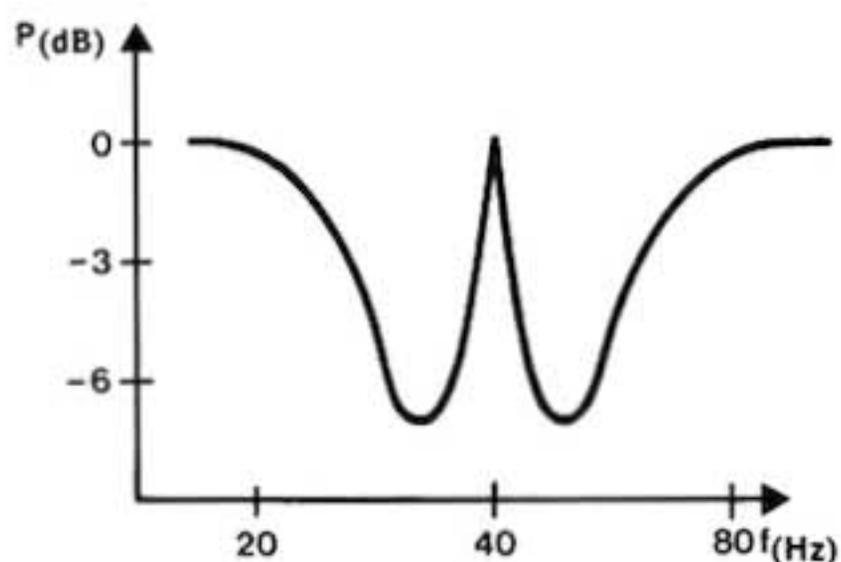


Bild 1.22c. Die (verheerende) Wirkung eines Oktavequalizers, wenn dieser zur Verminderung störender Raumresonanzen eingesetzt wird.

so wird nicht mehr absorbiert bzw. unterdrückt als nötig.

Weit verbreitet (weil sie preiswert produziert werden können) sind die grafischen 10-Band-(Oktav)-Equalizer. Sie sind allerdings nicht zur Lösung raumakustischer Probleme geeignet. Warum das so ist, zeigt die Kurve in Bild 1.22c. Die Bandbreite des Filters ist bei einem solchen Equalizer bereits bei einer Filtermittelfrequenz 10 mal so groß, wie die der störenden Resonanz! Bei höheren Frequenzen wird es dann noch schlimmer. Wenn ein Fachmann mit einem solchen Equalizer die Raumakustik verbessern will, dann sind seine Akustik-Kenntnisse nicht allzu hoch einzuschätzen. Das heißt nicht, daß diese Geräte völlig sinnlos sind. Zur Frequenzgangkorrektur von Tonband- und Kassettenrekorden sowie älteren Tonträgern sind sie durchaus sinnvoll. Nur bei der Bekämpfung raumakustischer Probleme richten Sie meist mehr Schaden als Nutzen an. (Daraus resultiert auch zum Teil ihr schlechter Ruf unter Hifi-Fans. Allerdings führen sie das immer auf sogenannte Phasenfehler durch Equalizereinsatz zurück; was in 99 % aller Fälle nicht stimmt.)

Ein Blick zu den Profis. Bei ihnen ist die Problematik der elektronischen Korrekturen natürlich sehr gut bekannt. Die eingesetzten Equalizer unterscheiden sich deutlich von den Amateurgeräten.

Der parametrische Equalizer, das mächtigste

Werkzeug in der Raumakustik, verfügt zum Beispiel über simultan einstellbare Mittenfrequenz, Bandbreite und Anhebung/Abschwächung. Damit läßt sich jede störende Resonanz korrigieren. Bei relativ vielen Störresonanzen wird die Sache sehr teuer, weil für jede Resonanz eine Filterstufe notwendig ist. Diese Filter sollen nur filtern, nicht rauschen. Die Erfüllung dieser Forderung kann besonders teuer werden.

Daneben gibt es auch grafische Equalizer für diese Anwendung. Anders als bei den Amateurgeräten arbeiten sie mit 1/6-Oktav-Bandbreiten. Das ist zwar nicht ganz so treffsicher, aber auch schon recht nützlich. Sie sind schneller zu bedienen als die parametrischen Equalizer; nur ebenso teuer. In beiden Fällen liegen die Preise in der Nähe interessanter Gebrauchtwagen. Daher beenden wir diesen Exkurs hier. Bleiben wir noch kurz bei den akustischen Absorbern, um

1. preiswerte Verbesserungen aufzuzeigen und
 2. die Verkaufsmethoden der Hifi-Branche kritisch unter die akustische Lupe zu nehmen.
- Die Absorber kann man als umgedrehte Baßreflexboxen betrachten. Eine Masse m (der Luftmenge im Reflextunnel) schwingt gegen eine Feder S (der Federsteife der Luft im Gehäuse) mit einer genau bestimmten Resonanzfrequenz f_s , die von den Werten für m und S abhängt (Bild 1.23).

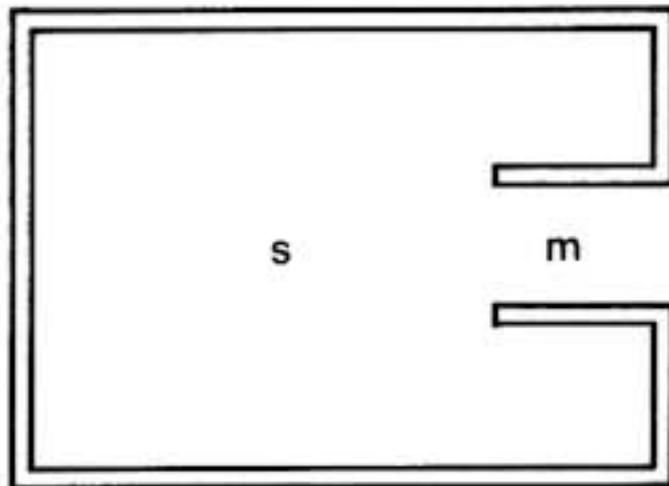
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{m \cdot \frac{1}{S}}} \text{ oder } f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{m \cdot C}}$$

m = Masse in kg

S = Federsteife (Stiffness) in N/m

$C = 1/S =$ Nachgiebigkeit (Compliance) in m/N

Derartige Gebilde sind sehr gut als Abschwächer zu verwenden. Wird die Schwingung des Absorbers nicht bedämpft, z.B. durch absorbierendes Material im Gehäuse, dann schwingt der Schwingkreis oder Resonator aus Masse und Feder sehr schmalbandig. Er verringert die Nachhallzeit des Raumes für seine Resonanzfrequenz. Selbst Raumresonanzen mit sehr geringer Bandbreite können wirksam bedämpft werden. Die Bedämpfung macht den Wirkungsbereich breitbandiger und es werden neben der Resonanzfrequenz des



m = Luftmasse im Tunnel
 s = Federsteife der eingeschlossenen Luft

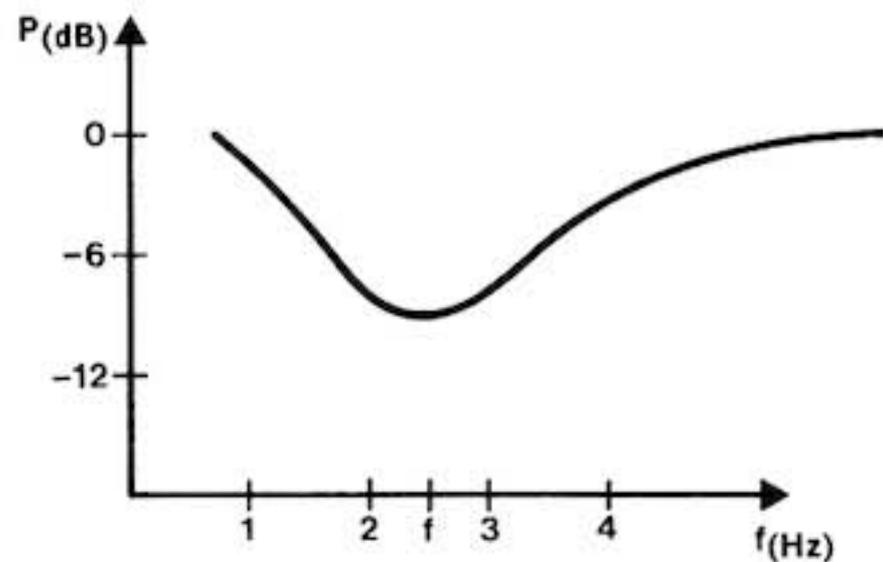
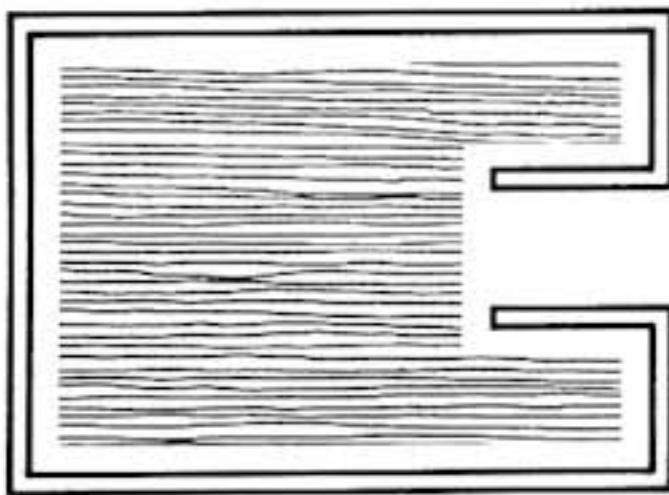
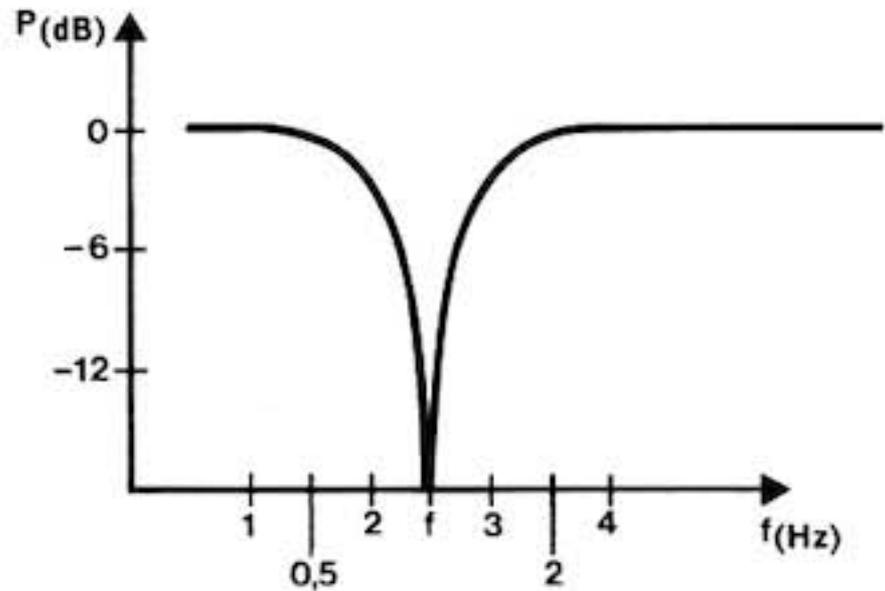


Bild 1.23. Der Aufbau eines akustischen Absorbers.

Absorbers auch andere Frequenzen absorbiert. Das Schöne an diesen Absorbern/Resonatoren ist jetzt, daß sich deren Bandbreite wie die Resonanzfrequenz konstruktiv recht gut festlegen läßt. Für die Feinabstimmung genügen wenige Handgriffe: man variiert Tunnellänge und Bedämpfung. Wenn die Resonanzfrequenzen des Hörraumes bekannt sind, so brauchen Sie nur die Nachhallzeit bei diesen Frequenzen zu messen, um die Bandbreite in etwa festzulegen. Es lassen sich dann leicht geeignete Absorber konstruieren, mit denen Sie (mit einigen weiteren Messungen der Nachhallzeit) die Raumakustik in den Griff bekommen. So, nun zu den Verkaufsmethoden der Hifi-Branche (die meisten Händler sind auf Grund äußerer Umstände leider dazu gezwungen). Wegen Platzmangel stapeln sich im Vorführraum die verschiedensten Lautsprecherboxen. Nebeneinander und oft übereinander steht hier ein derartiges raumakustisches

Absorber-Potential, dessen Einfluß auf die momentan betriebene Box nicht unerheblich ist. Eine Berechnung dieses Potentials ist mehr als aufwendig.

Bei der Vorführung eines Boxenpaares spielen alle anderen Boxen im Raum nicht nur als Dekorationsstücke eine Rolle! Im Gegenteil, sie arbeiten als Absorber. Bei geschlossenen Boxen schwingt jetzt die Membranmasse gegen die Federsteife der Luft im Gehäuse. Die Box wirkt dann, wenn sie nicht angeschlossen ist, als schmalbandiger Absorber. Sind die Anschlußklemmen der Lautsprecherbox dagegen kurzgeschlossen, so wirkt die Box als breitbandiger Absorber. Jetzt bremst der Magnet das Eigenleben des Schwingkreises genau wie das Dämmmaterial, nur wirkungsvoller. In beiden Fällen ist die Wirkung genau bestimmbar. Durch die verringerte Nachhallzeit verbessert sich die Baßwiedergabe in solchen Vorführräumen. Bei Baßreflexboxen passiert ähnliches, nur haben diese Boxen plötzlich zwei Resonanzfrequenzen, wobei nur die Resonanz des Lautsprecherchassis bei

kurzgeschlossenem Eingang als breitbandiger Absorber wirkt. Um die störenden Vorführeffekte auszuschließen wäre es ideal, wenn der Händler Ihnen die Boxen probeweise mitgibt. Es ist dann möglich, sie unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen zu testen und so alle störenden Einflüsse auszuschließen. Nur wenn Sie die Boxen in einem Raum gehört haben, von dem Sie sicher sind, daß nicht der Raum oder seine Möblierung selbst die erste (Baß)Geige spielt, kann man auch die Baßwiedergabe der Lautsprecherboxen beurteilen. Ansonsten sollten Sie sich fairerweise mit einem Werturteil über die getesteten Lautsprecherboxen zurückhalten.

Die Grundlagen für die Absorber-Berechnung finden Sie bei der Berechnung von Baßreflexgehäusen, wo es ebenfalls um die Abstimmung von Gehäusen auf bestimmte Resonanzfrequenzen geht.

Raumakustik und Platz der Boxen im Raum

So, wie kann man die störenden Resonanzen noch in den Griff bekommen? Zuerst sollten Sie diese Resonanzen grafisch erfassen und sie in eine Zeichnung des entsprechenden Hörraumes eintragen. Sie stoßen bei allen Berechnungen von Raumresonanzen in Wohnräumen mit normalen Abmessungen auf eine untere Resonanzfrequenz, die, bildlich gesprochen, ziemlich alleine dasteht und damit die Raumresonanzkurve stört. Beginnen wir mit dieser Resonanz. Sie liegt fast immer im Hörbereich (also über 15 Hz) und sollte daher be-

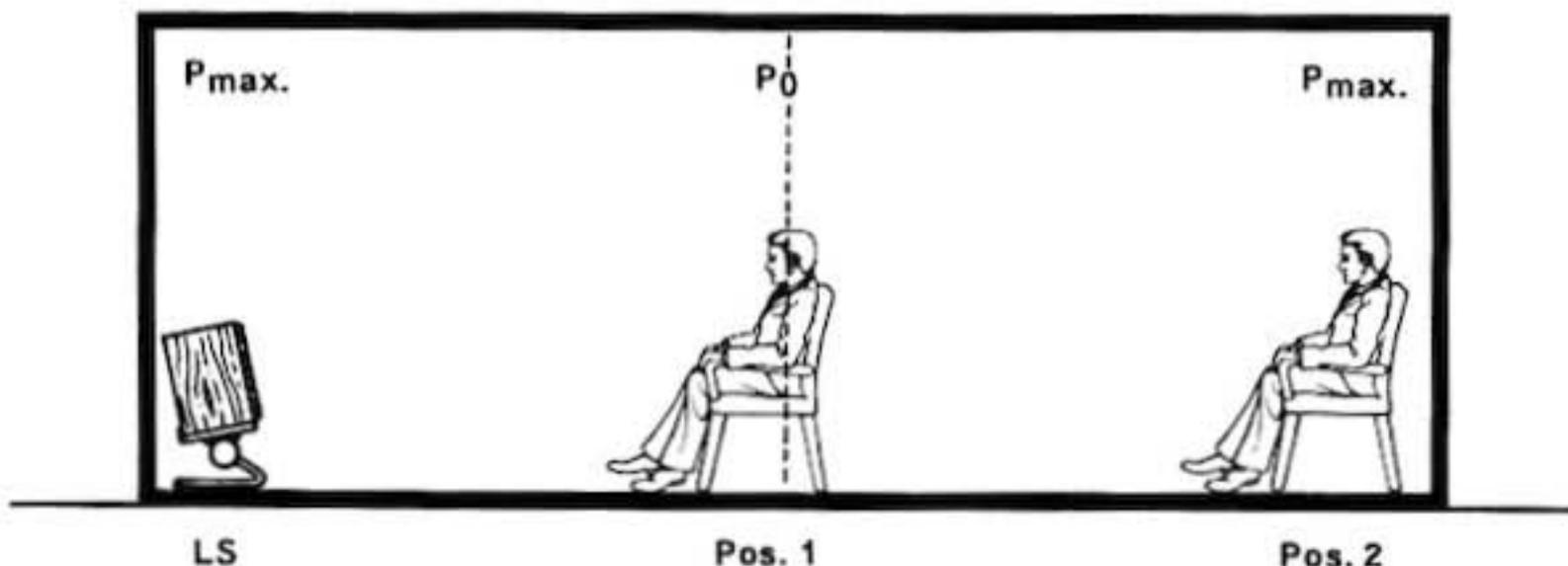
Bild 1.24. Schalldruckkurven an verschiedenen Positionen eines Hörraums.

dämpft werden. Das allerdings entfällt, wenn zufällig die Absorption des Raumes bei tiefen Frequenzen extrem hoch ist (Nachhallzeit unter 0,2 Sekunden). Das trifft in der Regel nur bei Räumen mit sehr dünnen Wänden zu – normalerweise sind bei tiefen Frequenzen deutlich längere Nachhallzeiten zu erwarten. Wie bereits erwähnt, befindet sich an den Raumwänden immer ein Druckmaximum, daher muß in der Mitte zwischen den Wänden immer ein Schnellmaximum für die tiefste Resonanzfrequenz sein. Grafisch ist das in Bild 1.24a abgedeutet.

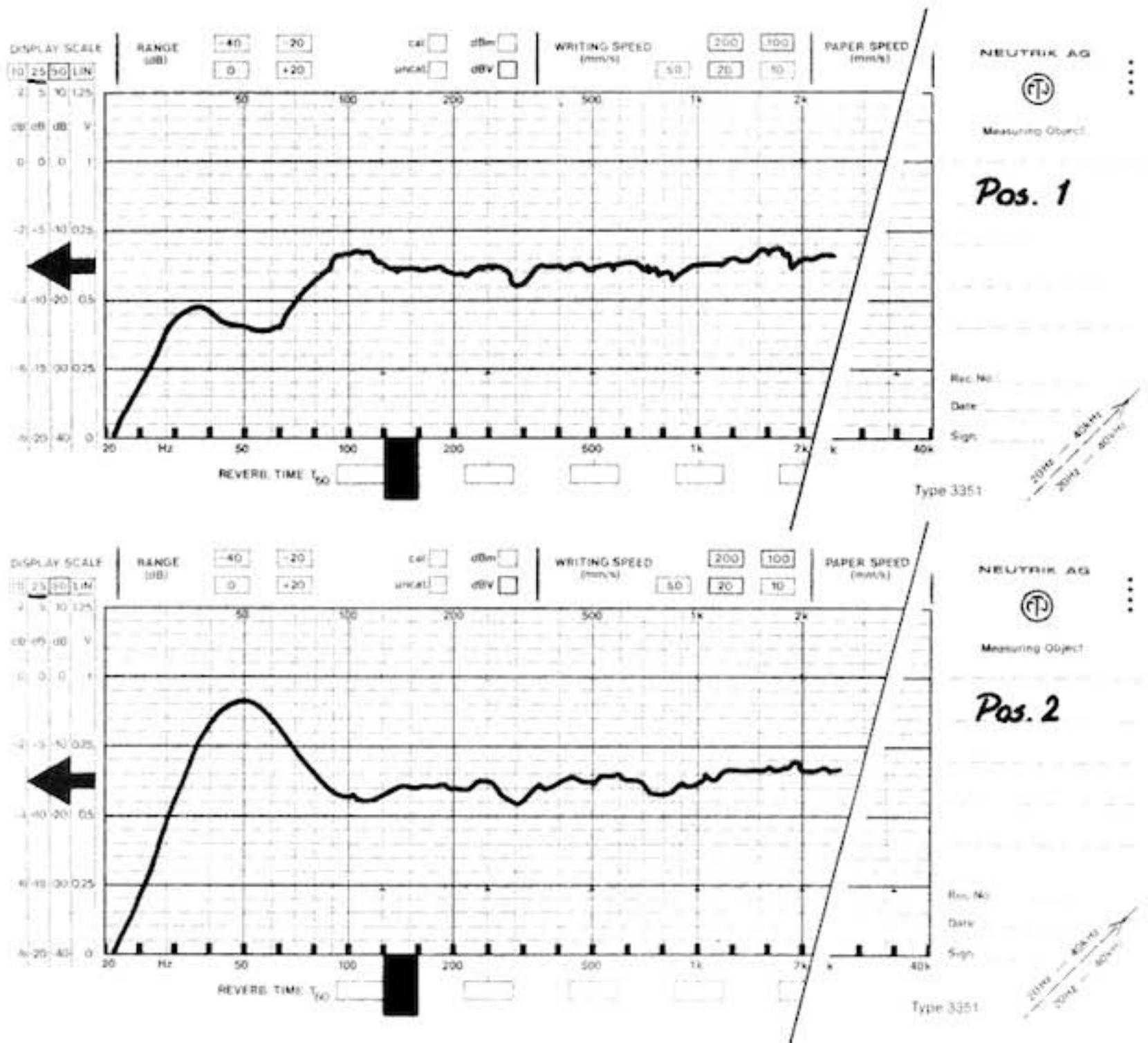
Die Position von P_0 kennzeichnet dabei das Druckminimum. Befindet sich der Hörplatz also in der Raummitte, dann ist von dieser tiefen Frequenz wenig zu hören. Die Raummitte ist überhaupt akustisch sehr ungünstig und sollte als Hörposition immer gemieden werden (je zwei gleiche Abstände zu den Wänden). Wenn der Hörplatz nicht auf der gezeichneten Linie liegt, hören Sie als Folge der Resonanz zur Rückwand hin die Störresonanz immer deutlicher. Ein Frequenzschrieb in Bild 1.24b zeigt das.

Zur Bedämpfung dieser Resonanzüberhöhung können Sie einen parametrischen Equalizer einsetzen. Ist nur diese eine Korrektur erforderlich, lohnt sich der Selbstbau einer Equalizerstufe – Fertigeräte sind dafür zu teuer. Als zweite Lösung kann zur Bedämpfung dieser Resonanz auch die Lautsprecherbox selbst herhalten. Dazu wird ihr mit Hilfe eines elektronischen Filters eine passende Resonanzfrequenz mit Dämpfung aufgeprägt. Man kann dabei Lautsprecherboxen und Raum als ein System mit einer bestimmten Resonanzfrequenz und Bandbreite der Resonanzüber-

24a



b



86902-1.24.b.

höhung betrachten. Dabei wird die Lautsprecherbox so konstruiert, daß die Resonanzfrequenz der Box der untersten Raumresonanz entspricht (Bild 1.25a).

Die Resonanzkurve aus Bild 1.25a läßt sich durch elektronische Korrekturen leicht verändern. Es sind dann Ergebnisse möglich, wie sie in den Bildern 1.25b und 1.25c skizziert sind. Dieses Vorgehen dürfte versierten Selbstbau-Konstrukteuren passiver Lautsprecherboxen höchst sonderbar vorkommen. Statt die Herstellerangaben für die optimale Gehäusegröße peinlichst genau einzuhalten, um bestes Ausschwingverhalten usw. zu erzielen, wird hier das Tieftonchassis regelrecht überfahren. Womöglich soll ein riesiger 38 cm Baß-Lautsprecher in ein 25 l Gehäuse, nur weil die unterste Raumresonanz des Abhörortes bei

65 Hz liegt. Stimmt, genau das ist es, denn mit einem passenden Filter lassen sich nun auch 25 Hz problemlos reproduzieren. Da gleichzeitig das Filter dem Tieftonchassis noch eine neue, tiefere Resonanzfrequenz aufprägt, gibt es auch keine Probleme mit dem Ausschwingverhalten des großen Chassis im kleinen Gehäuse. Diese Methode ist keine Zukunftsmusik. Sie funktioniert schon seit längerer Zeit, aber natürlich nur bei denen, die ihre Boxen selbst bauen und berechnen können. Dabei darf man die ansteigende Kurve der Entzerrung nicht mit der benötigten Membranauslenkung für konstanten Schalldruck verwechseln. Unterhalb der untersten Raumresonanz gilt ja das Druckkammermodell. Hier ist der erzeugte Schalldruck nur von der Volumenänderung der Luft im Hörraum abhängig.

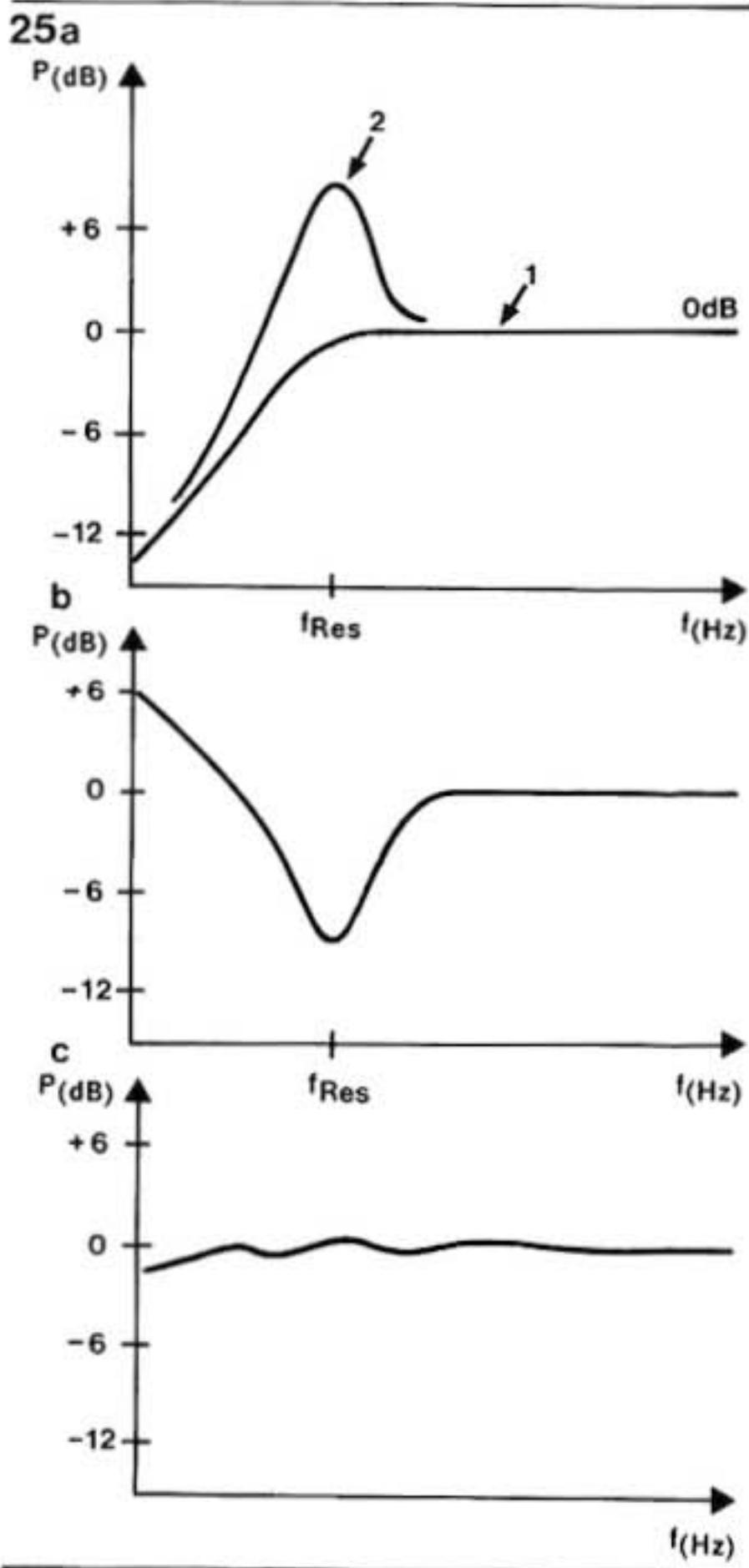


Bild 1.25. Die Wiedergabekurve Lautsprecher/Raum kann mit einer einfachen elektronischen Korrektur linearisiert werden. Leider klappt das nicht für alle Positionen im Raum gleichzeitig, aber es hilft, die Wiedergabe am Hörplatz zu verbessern. Im Diagramm 1.25a ist die Schalldruckkurve der Box im Meßraum (1) und die der Box am Hörplatz (2) aufgetragen. Das Korrekturfilter muß bei der Resonanzfrequenz einen negativen Peak aufweisen (Bild 1.25b), damit der positive Peak aus Bild 1.25a am Hörplatz kompensiert wird (Bild 1.25c.).

Damit ist für konstante Membranauslenkung auch der Schalldruck konstant und bis hinunter zu 0 Hz frequenzunabhängig. Die Kurve gibt nur Auskunft darüber, welche elektrische Leistung notwendig ist.

Der Haken liegt wo anders. Das Druckkammermodell ist, wie der Name ja sagt, nur ein Modell. Modelle sind aber im wissenschaftlichen Bereich immer vereinfachte Abbildungen der Realität und daher mit Vorsicht zu genießen. Die Wände Ihres Wohnraumes sind nicht unendlich stabil (die Nachbarn können das sicherlich bestätigen). Weiterhin ist der Raum nicht völlig luftdicht, so daß im konkreten Fall Abweichungen vom Modell auftreten. Die Kurve für die richtige elektronische Korrektur ist daher, auch bei gleich aussehenden Räumen, nicht immer identisch. Die Grafik in Bild 1.26. zeigt das.

Die in diesen Räumen verwendeten Baßlautsprecher sollten schon über größere Membranflächen verfügen; zwei mal 30 oder 38 cm sind schon angebracht, um die nötigen Membranauslenkungen in Grenzen zu halten.

Ohne etwas zu experimentieren, kommt man wohl in den seltensten Fällen zurecht. Aber gerade zum Experiment soll das Buch ja auch ermutigen. Die notwendigen Grundlagen und Bauvorschläge für derartige Filter folgen später. Hierfür sind einige Kenntnisse über die Funktion der Lautsprecher selbst notwendig. Als dritte Möglichkeit zur Bedämpfung der untersten Raumresonanz können Absorber Verwendung finden. (Tüftler sollen bereits ganze

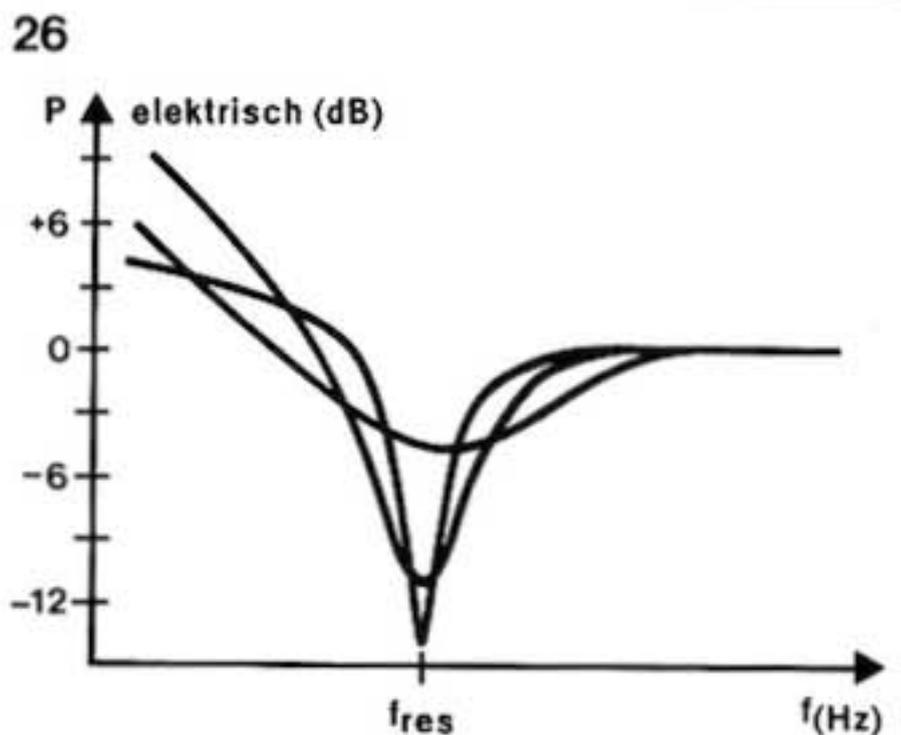


Bild 1.26. Individuelle Entzerrungskurven verschiedener Räume.

Schrankwände mit genau dimensionierten Baßreflexöffnungen versehen haben.) Wenn ausreichend Platz vorhanden ist, dann sind einige Versuche mit Nachhallmeßgerät und alten Baßreflexgehäusen (Abstimmung siehe Kapitel Baßreflexgehäuse) nicht falsch. Es ist eine billige Lösung, die noch dazu den verständlichen Ansprüchen derjenigen Hifi-Puristen genügt, die keine Selbstbau-Elektronik in ihre teure High-End Anlage einschleifen möchten.

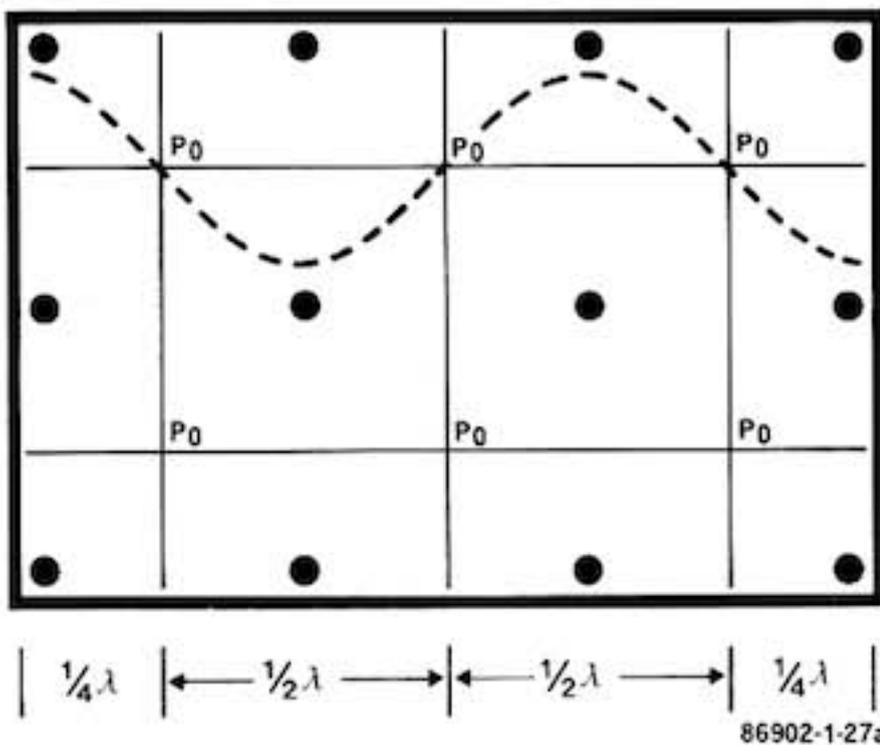
Mit der Aufstellung der Box im Raum sind Sie gegen die unterste Raumresonanz völlig machtlos. Um die Anregung einer Resonanz zu vermeiden, muß die Box in der Nähe eines Schnelleximums stehen, dann aber steht sie mitten im Raum. Erst bei höheren Frequenzen ist hier was zu machen.

Nun zu den höherfrequenten Resonanzen und deren grafischer Darstellung. Auch hier sind für alle störenden Frequenzen Linien zu ziehen, die alle Schnellexima (das sind gleichzeitig die Druckminima) berücksichtigen. In einem Raum sind es z.B. mehrere Linien für $n_x = 3$, $n_y = 2$ und $n_z = 2$, die den Raum in verschiedene Vierecke teilen. In jeder Viereckmitte befindet sich ein Druckmaximum der Resonanz.

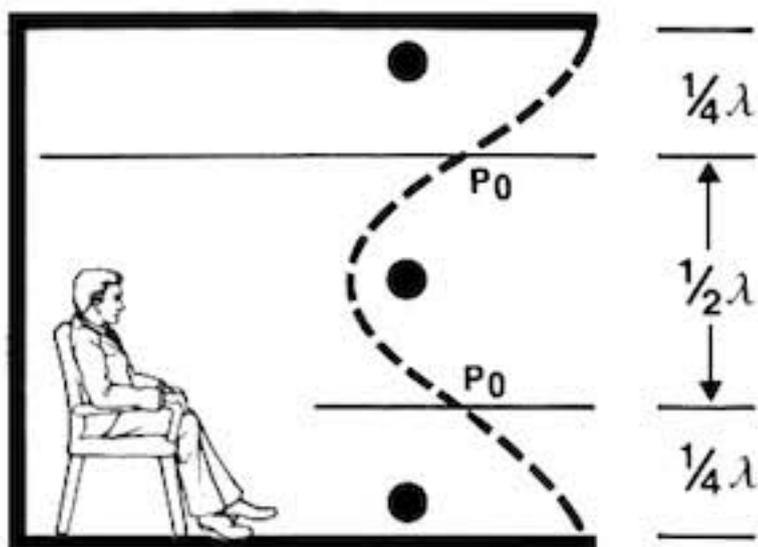
Jetzt benötigen Sie etwas Phantasie, denn die dritte Dimension, die Höhe, fehlt im Bild. Für $n_z = 2$ entstehen vertikal 2 Druckminima; bei $n_z = 1$ ist es nur noch eins auf halber Raumhöhe. Beide Situationen sind in Bild 1.27b dargestellt.

Gleichzeitig läßt das Bild erkennen, daß Sie hier bereits mit der Aufstellung der Box sehr viel ausrichten können. Um eine vertikale Resonanz mit $n = 1$ zu vermeiden, muß das Tieftonchassis auf halber Raumhöhe angebracht sein. Stört eine Resonanz mit $n = 2$, so hilft die Aufstellung der Box mit dem Baßchassis in $1/4$ -Raumhöhe. Hierdurch wird deutlich, warum nie klar gesagt werden kann, ob das Baßchassis in einer Lautsprecherbox besser über oder unter dem Mitteltöner plaziert ist. Mal klingt das eine besser, mal das andere – je nach Raum und Position im Raum. Es ist ebenso deutlich, daß es völlig falsch ist, ein Baßchassis unmittelbar über dem Boden anzubringen, da so alle vertikalen Resonanzen maximal angeregt werden.

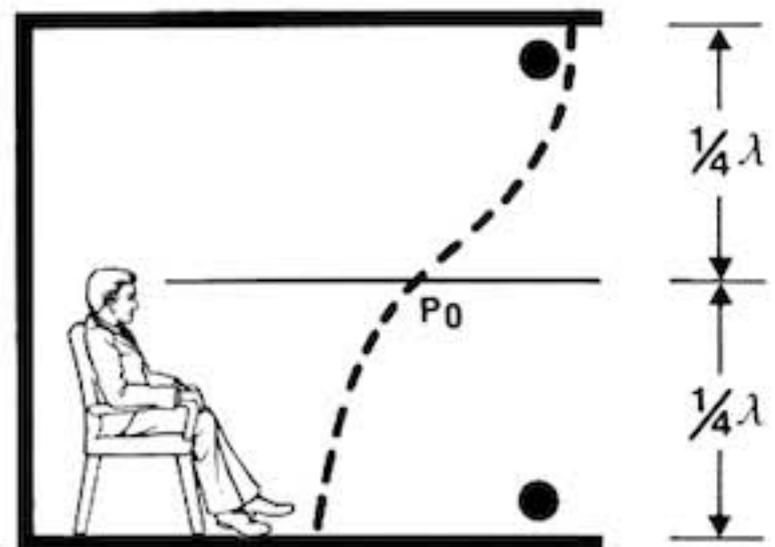
27a



b



● = Druckmaximum
 P_0 = normaler Luftdruck
 (Schnelleximum)



86902-1-27b

Ein Blick auf etwas exotischere Lautsprecherkonstruktionen ist hierbei recht interessant. Es gibt sogenannte Flächenstrahler und säulenförmige Lautsprecher, bei denen entweder eine sehr große Membranfläche im Tieftonbereich eingesetzt wird (wie bei den Magnetostaten, Elektrostaten und Bändchen-Lautsprechern für tiefe Frequenzen), oder bei denen mehrere Einzelchassis übereinander angeordnet sind (Bild 1.28). Diese Lautsprecher vermeiden vertikale Resonanzen, da sie über mindestens die halbe Raumhöhe überall gleichzeitig Schalldruck erzeugen.

Hier können sich mangels Schnellexima keine vertikalen Resonanzen bilden, was diesen Lautsprechern bei Hörtests immer einen Vorteil gegenüber willkürlich aufgestellten konventionellen Boxen verschafft. Bei richtig aufgestellten Boxen ist der Vorteil dann meist gar nicht mehr so groß.

Es muß bei der Aufstellung von Lautsprecherboxen immer gleichzeitig noch ein anderer Aspekt beachtet werden. Nicht nur Raumresonanzen, sondern auch Reflektionen der nahen Wände beeinflussen die Baßwiedergabe der Kombination Lautsprecher/Raum. Befassen wir uns also einmal mit der Baßwiedergabe im reflektionsarmen Testraum und vergleichen sie mit der im Wohnraum. Wie läßt sich die günstigste Aufstellung hinsichtlich der Raumresonanzen mit der günstigsten Aufstellung für möglichst lineare Baßwiedergabe kombi-

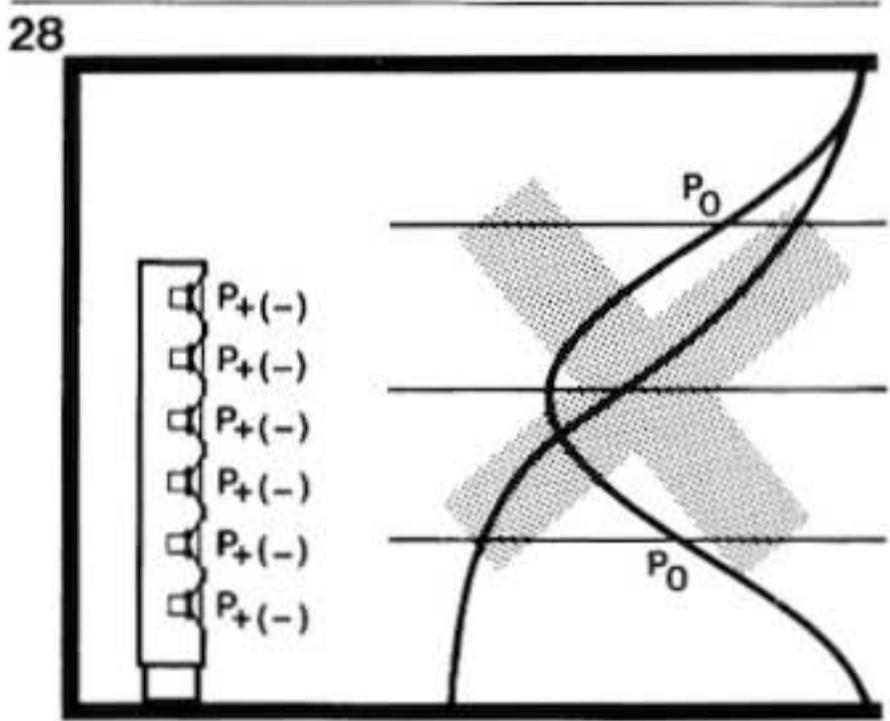


Bild 1.28. Bei Lautsprecherboxen mit mehreren übereinander angeordneten Chassis können meist keine vertikalen Raumresonanzen auftreten.

nieren? Wir wissen, daß störende Raumresonanzen spitze Peaks mit geringer Bandbreite sind. Sie können zu Klangverfärbungen im Baßbereich führen. Die Folgen der Wandreflektionen sind dagegen breitbandiger und weniger resonant. Da sie jedoch ebenfalls Frequenzgangfehler von 20 dB verursachen können, sollte man sie im Auge behalten.

Für das störende Phänomen bei der Baßwiedergabe in Räumen ist wieder der akustische Spiegel "Wand" zuständig. Es kommt zur Überlagerung von Schallwellen und Schallfeldern. Im Gegensatz zu den Raumresonanzen und Stehwellen sind diese Überlagerungen nicht deckungsgleich.

Vergleichen wir kurz Werbung und Realität. Eine Box wird mit einem Frequenzgang – wie in Bild 1.29a skizziert – umworben und verkauft.

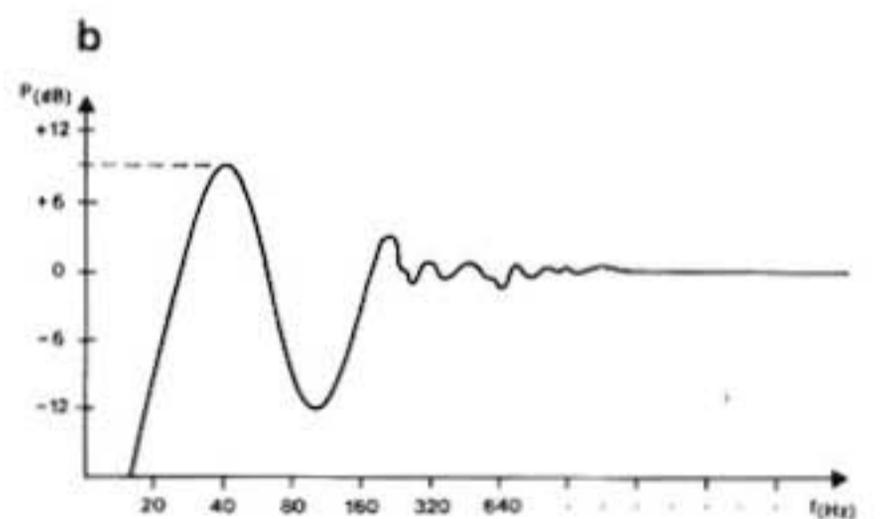
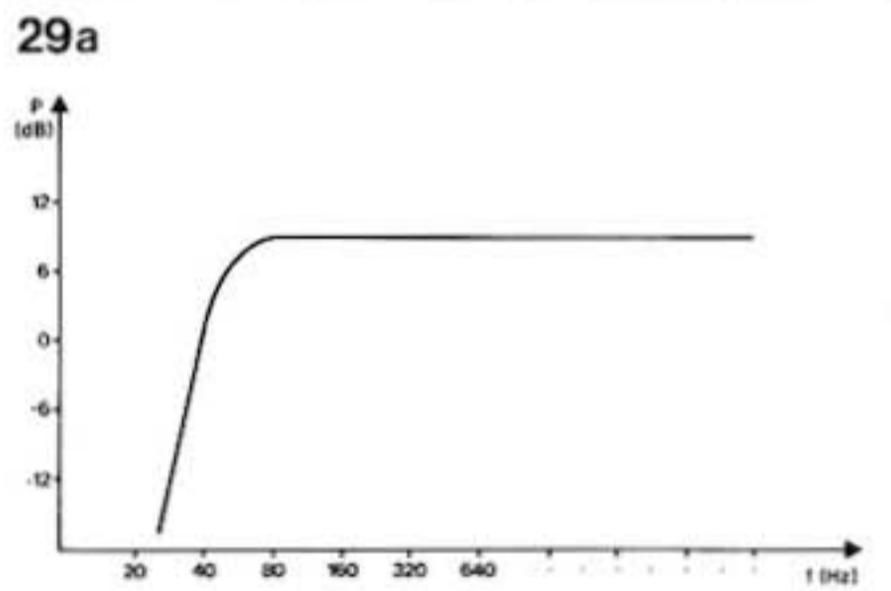


Bild 1.29.

Mißt man den Frequenzgang der Box in Ihrem Wohnzimmer nach, sieht die Frequenzgangkurve ganz anders aus (Bild 1.29b).

Zufrieden? Vermutlich nicht. Was ist passiert? Haben Hersteller oder Händler die Qualität der Box falsch dargestellt? Liegt nur ein Mißverständnis vor? Nun, versuchen wir dem Unterschied auf die Spur zu kommen. Untersucht man den Einfluß einer Wand, z.B. des Fußbodens, auf dem die Box steht, findet man eine Veränderung der Schalldruckkurve gegenüber einer Messung im reflektionsarmen Raum entsprechend Bild 1.30.

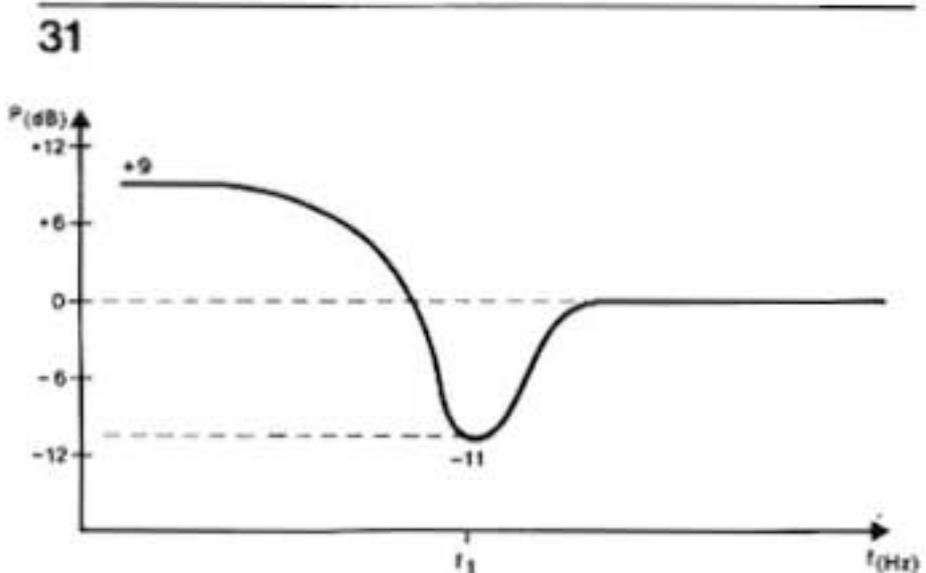
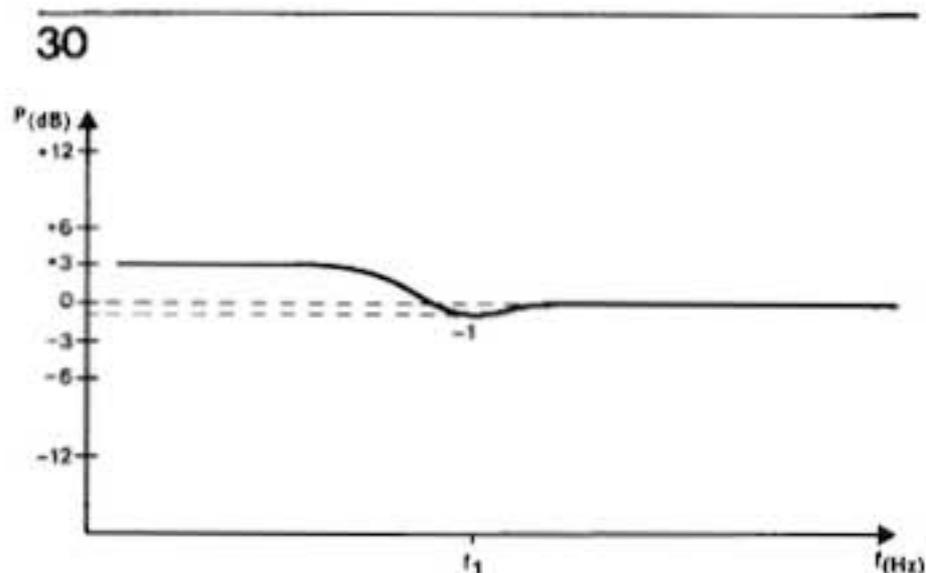


Bild 1.30. Der Einfluß jeder schallharten Wand auf den Verlauf der Schalldruckkurve einer Lautsprecherbox wird nur durch das Verhältnis von l (Abstand der Box zur Wand) und der Wellenlänge verschiedener Frequenzen bestimmt. Die Zeichnung zeigt den Einfluß einer Wand.

Bild 1.31. Der Einfluß von drei Raumwänden auf die Wiedergabe einer Lautsprecherbox bei gleichem Abstand zu den Wänden.

Tiefe Frequenzen werden um ca. 3 dB lauter; bei mittleren Frequenzen erfolgt eine kleine Absenkung um ca. 1 dB. Für höhere Frequenzen ist keine Veränderung feststellbar. Ist das Tieftonchassis z.B. 80 cm über dem Fußboden montiert, liegt die Absenkung bei etwa 150 Hz, während Frequenzen unter 80 Hz um 3 dB verstärkt werden. Das ist durchaus noch im Rahmen der Hifi-Wiedergabetoleranzen. Nur wenn jetzt Rück- und Seitenwand des Raumes auch 80 cm vom Tieftonchassis entfernt sind, verlassen wir den Hifi-Bereich. Die Kurve ändert sich dann so, wie es Bild 1.31 zeigt.

Dieser Effekt wird üblicherweise so erklärt: Befindet sich eine Lautsprecherbox im Abstand X von einer reflektierenden Wand, so entsteht eine scheinbare virtuelle Schallquelle im gleichen Abstand auf der anderen Seite der Wand. Der resultierende Schalldruck errechnet sich wie der Schalldruck, den beide Schallquellen erzeugen würden, wenn die Wand nicht vorhanden wäre. Die Gleichung hierfür lautet:

$$P_{\text{tot}} = \frac{\sin\left[\left(4\pi \frac{X}{\lambda}\right)\sin\theta\right]}{2\sin\left[\left(2\pi \frac{X}{\lambda}\right)\sin\theta\right]}$$

Für die abgestrahlte Schalleistung gilt:

$$P = \sum_{\theta=0}^{\pi} p^2 \cos\theta$$

Dabei gibt die erste Gleichung den Schalldruck an, der in verschiedene Richtungen erzeugt wird. Die zweite Gleichung berechnet die Summe der in alle Richtungen abgestrahlten Schalleistung. Das Verhältnis X/λ ergibt sich aus Abstand der Schallquelle zur Wand/Wellenlänge der untersuchten Frequenz. Für drei Wände ist die Berechnung etwas komplexer, aber sinngemäß genauso. Das Ergebnis ist akustisch jedoch höchst unerfreulich und nicht gerade das Kennzeichen guter Baßwiedergabe.

Was ist also zu tun, um diese unerwünschte Frequenzgangmanipulation durch Raumwände zu minimieren? Bleiben Sie realistisch. Greifen Sie zu Lautsprecherboxen mit weniger Baß; In normalen Wohnräumen sind Lautsprecherboxen mit höheren (Verkaufs)Resonanzen meist sinnvoller.

Frequenzgang im Wohn- und Meßraum

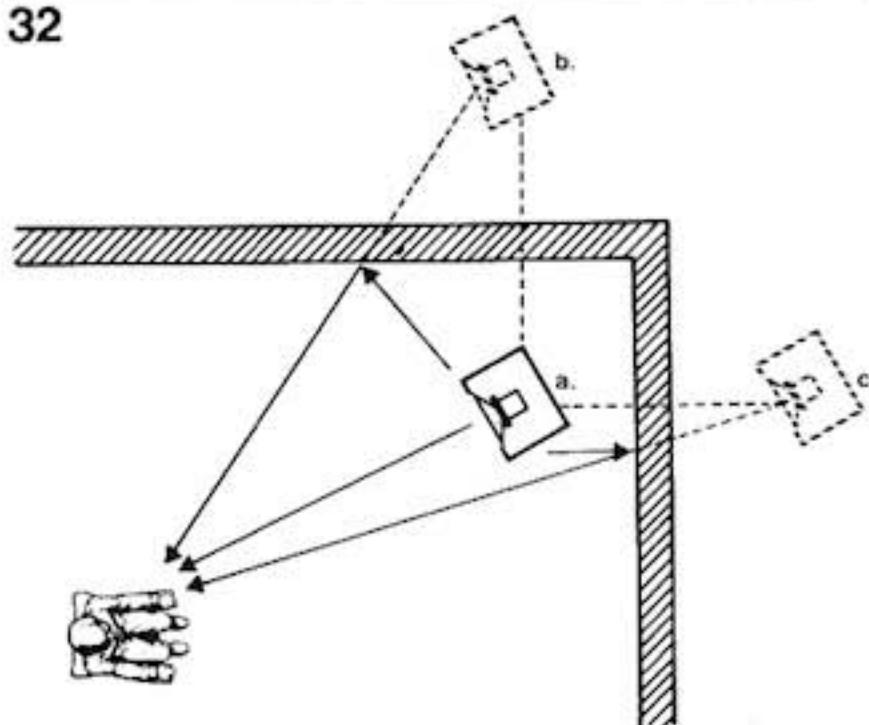
Was nützt eine Box, deren Frequenzgang im Meßraum bis 20 Hz linear ist, wenn der Frequenzgang dieser Box bei Ihnen später so aussieht, wie in Bild 1.33 dargestellt.

Eine Box mit weniger Baß (auf dem Papier) kann in Ihrem Wohnraum eine Baßwiedergabe realisieren, wie es Bild 1.34 zeigt.

Wir können hier schon einmal festhalten, daß sich das Loch im Frequenzgang der Kurve aus Bild 1.33 nie mit einem Equalizer ausbügeln läßt, weil es ja eine Folge auslöschender Reflektionen ist. Wenn man nämlich mehr Leistung an die Box liefert, verstärkt man auch diese Reflektionen. Das Ergebnis ist gleich Null.

Der entscheidende Faktor für die Baßwiedergabe einer Box im Raum ist bereits bekannt: das Verhältnis von Wellenlänge zum Abstand Box/Wände. Jeder Hifi-Fan weiß auch, daß eine Lautsprecherbox nicht in einer Raumecke stehen sollte, um ein Dröhnen im Baßbereich zu vermeiden. Aber nur die wenigsten wissen, daß es nicht damit getan ist, eine Box um 1,5 m aus der Ecke zu entfernen. Ein 30-Hz-Ton hat eine Wellenlänge von 11,5 m ($344 : 30 = 11,5$). Diese Wellenlänge macht sich wenig aus 1,5 m Abstand. Es kann daher vorkommen, daß je nach Box sehr viel größere Abstände nötig werden, um eine halbwegs ausgewogene Baßwiedergabe zu erzielen. Um das alles etwas greifbarer zu machen und einen Überblick über den fatalen Einfluß der Wellenlängen tiefer Frequenzen auf die meist beengten Platzverhältnisse in normalen Wohnräumen zu erhalten, sehen Sie sich die

32



86902-1.32.

33

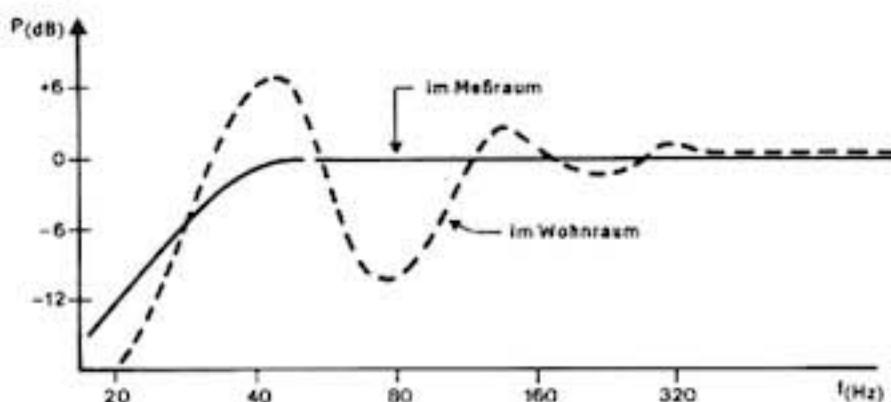


Bild 1.32. Durch jede Reflektion entsteht scheinbar eine zweite (virtuelle) Schallquelle.

Bild 1.33.

Bild 1.34.

34

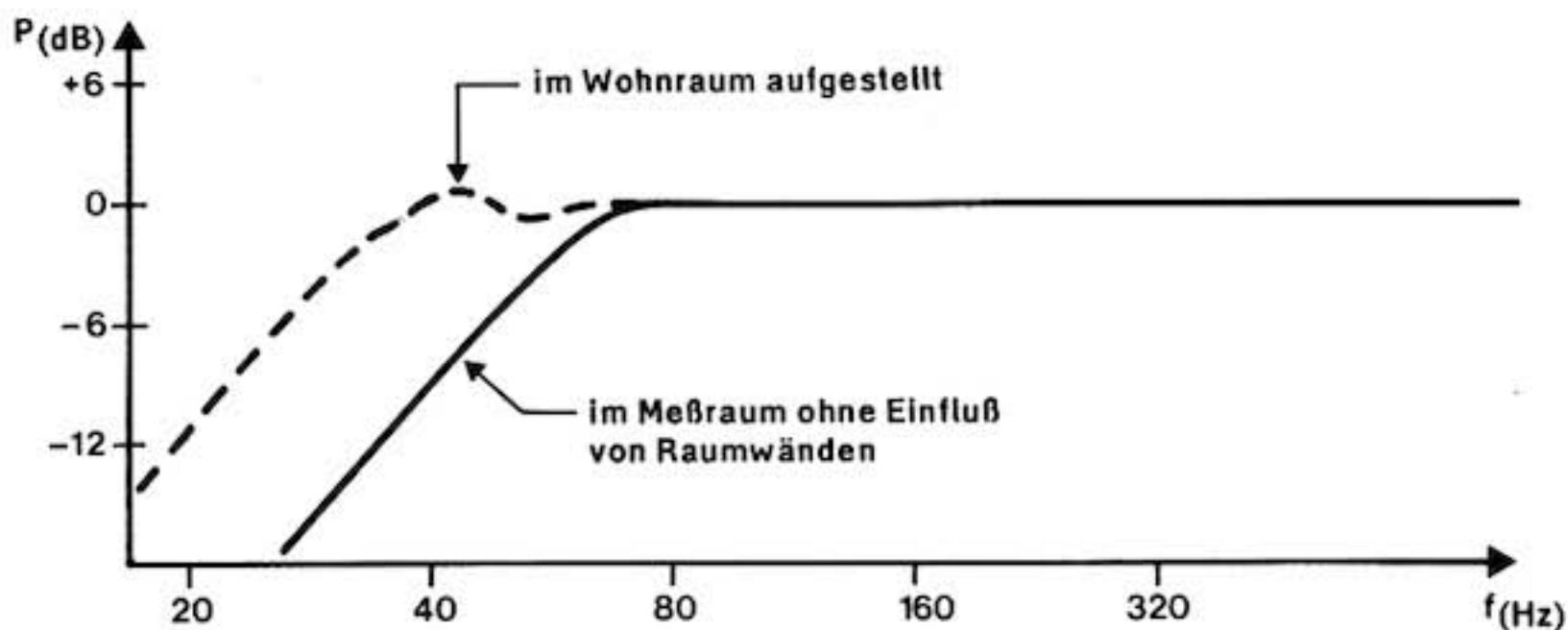


Tabelle an. Sie ist das Ergebnis einer Berechnung über den Einfluß von drei nahen Wänden eines Raumes auf den Wiedergabefrequenzgang verschiedener Lautsprecherboxen mit unterschiedlichem Frequenzverlauf. Mit einem Computer-Optimierungsprogramm wurden die Einflüsse der Reflektionen berechnet und nach den günstigsten Abständen gesucht. Die Tabelle zeigt die Positionen, bei denen sich die günstigsten Ergebnisse einstellten. Dabei hat der Frequenzverlauf in den besten Fällen nur eine lineare Toleranz von ± 2 dB.

Alle Entfernungen sind unterschiedlich. Das ist eigentlich auch verständlich, denn nur so fallen alle Auslöschungen (Dips in der Fachsprache) auf verschiedene Frequenzen und werden gegebenenfalls durch andere

Tabelle

f_s	Q_{ts}	l_1 (m)	l_2 (m)	l_3 (m)
20 Hz	1,414	4,010	4,780	2,900
	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	1,414	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	1,414	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	1,414	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	1,414	1,140	1,360	0,830
	1,000	0,720	1,540	0,980
	0,707	0,460	1,210	0,760
	0,500	0,470	0,810	0,250
80 Hz	1,414	1,000	1,200	0,730
	1,000	0,630	1,360	0,870
	0,707	0,410	1,100	0,680
	0,500	0,420	0,720	0,230

(Q_{ts} = Schwingkreisgüte der Lautsprecherbox)

Überhöhungen (Peaks) kompensiert.

Die berechneten Tabellenwerte ändern nichts an der Baßwiedergabe der Boxen und auch nichts an den Eigenschaften des Raumes. Es stellt sich also die Frage, was denn mit der Anhebung des Schalldrucks zu tiefen Frequenzen geschehen ist. Die Anhebung ist noch vorhanden, allerdings wird jetzt erst da angehoben, wo die Box von sich aus weniger Schalldruck produziert, also bei sehr tiefen Frequenzen. Das Ergebnis ist eine Baßwiedergabe, die gegenüber der Herstellerangabe um 2/3 Oktaven nach unten ausgedehnt wird. (Für gleiche Leistung bezogen auf Wirkungsgrad und neuer Grenzfrequenz im Meßraum, müßte eine Lautsprecherbox das 9fache Volumen aufweisen; das wird später noch erläutert.) Wenn man also mit den Abständen etwas experimentiert bzw. jongliert, erhält man für relativ wenig Geld eine gute bis exzellente Baßwiedergabe. Die günstigste Position ist dabei nicht immer leicht zu finden, da neben den Werten aus dieser Tabelle auch die Raumresonanzen berücksichtigt werden müssen. Die Lautsprecherbox sollte gleichzeitig immer im Schnellemaximum störender Raumresonanzen aufgestellt sein. In allen Fällen darf die Resonanzfrequenz der Box aber nicht absurd tief liegen.

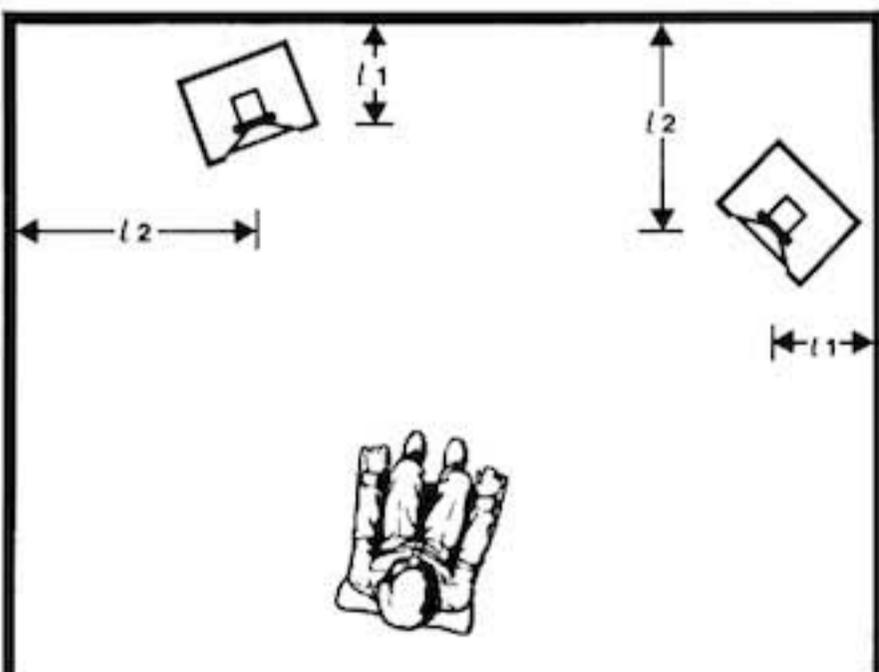
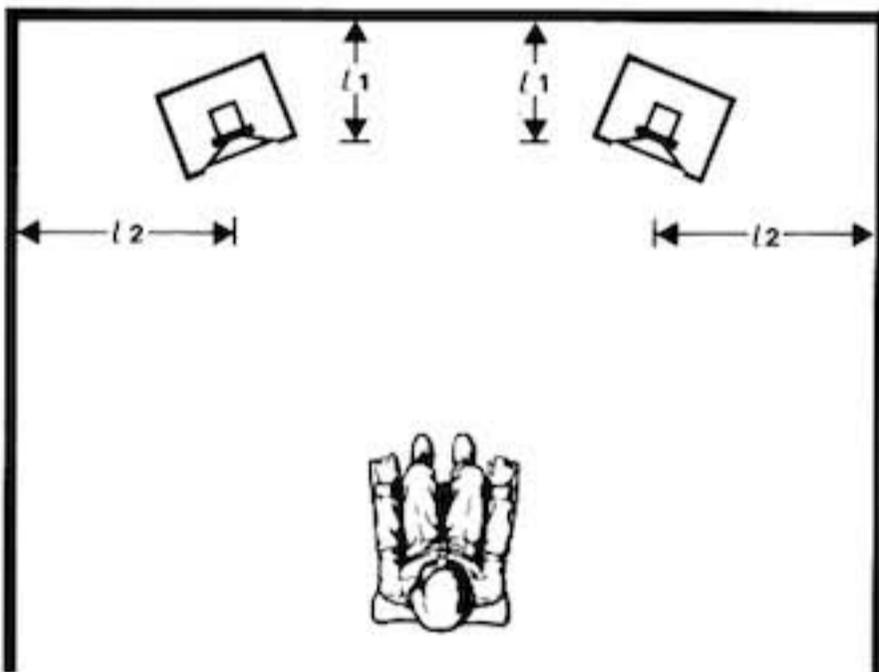
Sehen Sie sich die Tabelle einmal in Ruhe an und überlegen Sie, wo in Ihrem Wohnraum eine Box mit 20 Hz Resonanzfrequenz und einer Güte von $Q_{ts} = 1$ den optimalen Standort hat. Nicht vergessen: Die genannten Abstände beziehen sich immer auf die drei nächsten Wände; alle anderen müssen noch weiter entfernt sein.

Wenn Hifi-Händler und Verkäufer die Resonanzfrequenz und die Güte einer Box als Maßstab für die Baßwiedergabe dieser Box heranziehen, ist das entschuldbar, denn sie wollen etwas verkaufen. Boxen mit tiefen Resonanzfrequenzen lassen sich immer noch besser und teurer verkaufen. Die Branche kann damit mehr verdienen. Sie als Käufer oder Selbstbauer sollten auf diese Verwechslung jedoch nicht hereinfallen, ansonsten bezahlen Sie mehr Geld für weniger Hifi!

Das Ergebnis all dieser Überlegungen: Berechnen Sie die Raumresonanzen des Wohnraumes und fertigen Sie ein Diagramm davon an. Bei welcher Frequenz liegt die unterste Resonanz des Raumes? Bei welchen

Frequenzen liegen weitere störende Resonanzen? Wo sind deren Schnellmaxima, in denen die Lautsprecherboxen aufgestellt werden sollten, um die Anregung dieser Resonanzen zu vermeiden? Wenn alle diese Fragen beantwortet sind, haben Sie eine Reihe von günstigen Abständen zu Boden, Rückwand und Seitenwand zur Auswahl. Jetzt stellt sich die Frage, ob man die Boxen symmetrisch oder asymmetrisch aufstellt. Dabei wird bei einer Box nur der Abstand für Seiten- und Rückwand vertauscht (Bild 1.35).

35



Asymmetrisch ist ideal, da Sie dabei nicht in der Raummitte sitzen müssen und so dem Druckminimum der ersten Resonanz zwischen beiden Seitenwänden ausweichen. (Dem Druckminimum der zweiten Resonanz, $1/4$ des Wandabstandes, können Sie durch geringe Änderung der Entfernung zu den Boxen leicht entgehen.)

Es gibt nun zwei Möglichkeiten:

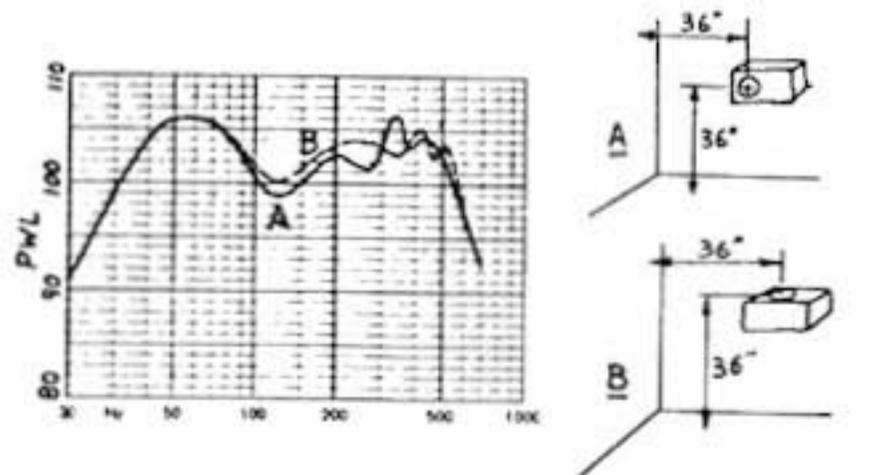
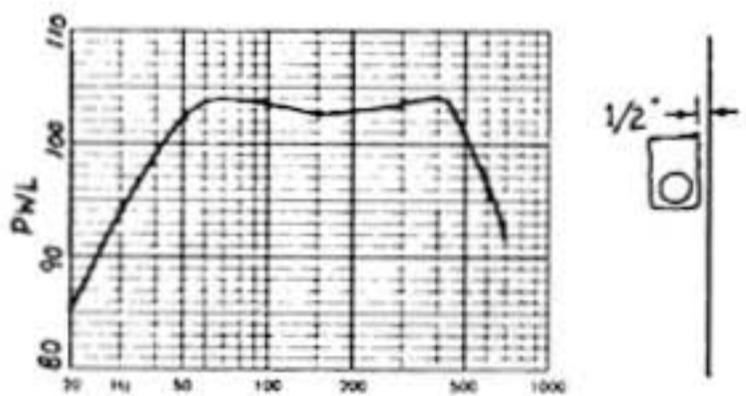
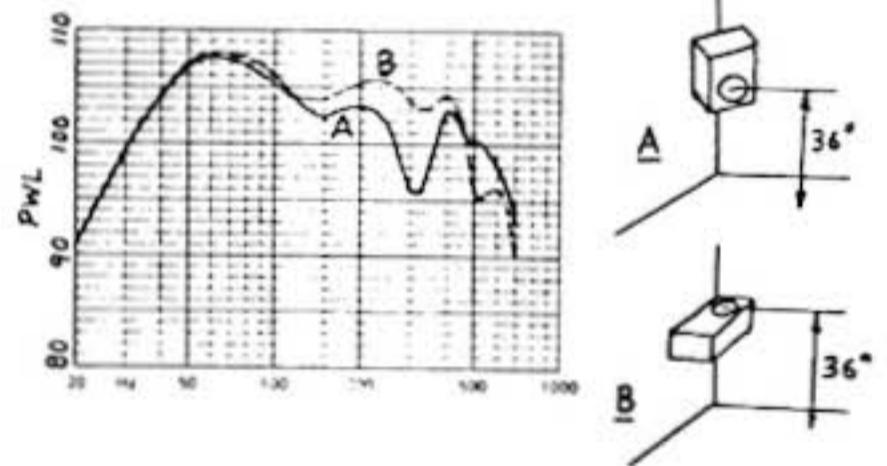
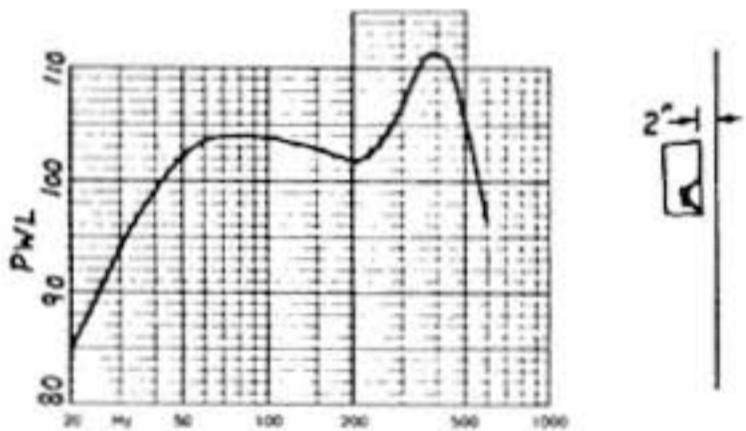
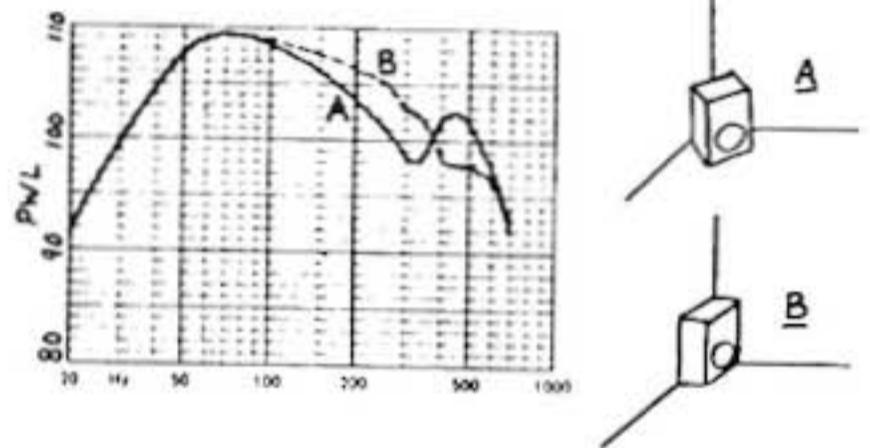
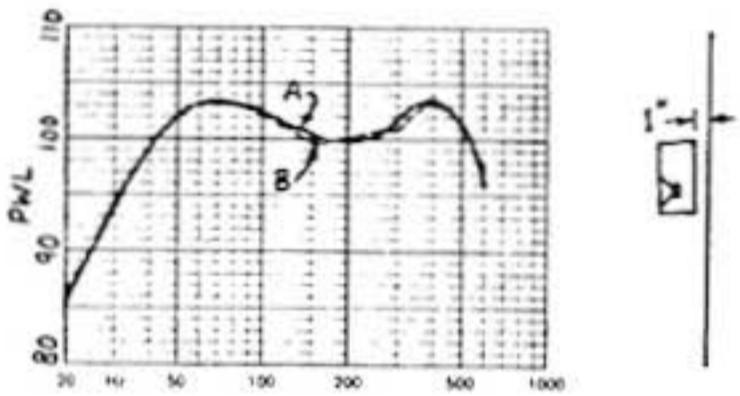
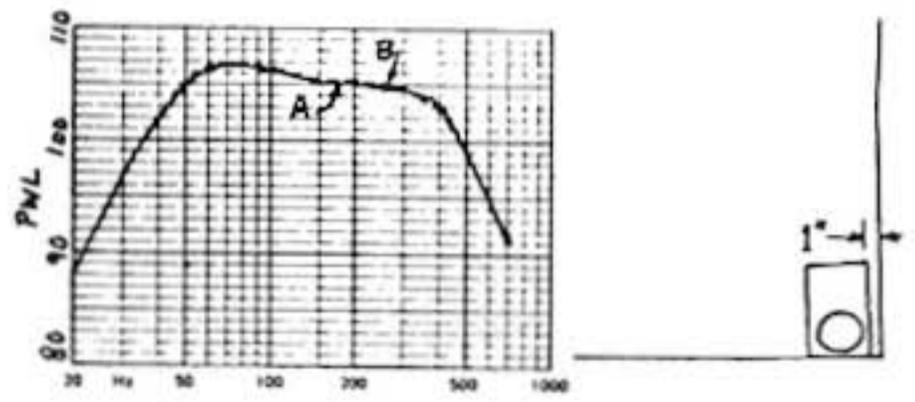
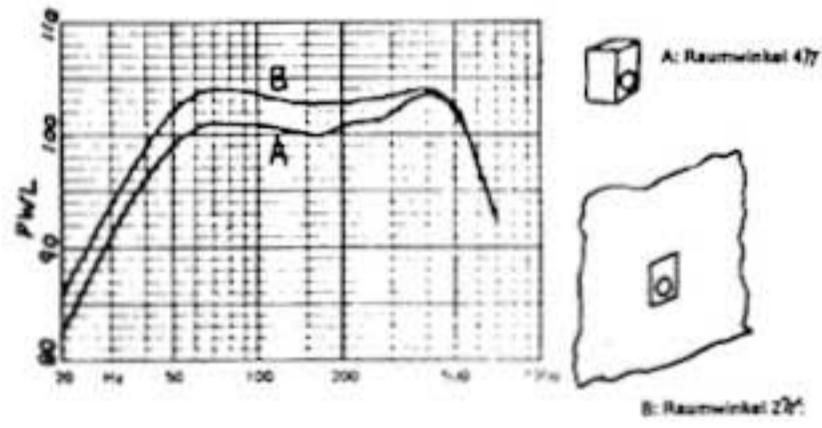
1. Sie haben bereits Lautsprecherboxen und denken nicht daran, sich schon wieder neue zu kaufen. Der einfache Weg ist, die Daten der Box zu messen (was mit einfachsten Geräten möglich ist), dann die für diese Aufstellung günstigsten Daten aus der Tabelle zu entnehmen und die Box mit einem elektronischen Entzerrungsfilter auf die günstigste Resonanzfrequenz und Güte einzustellen. (Einige Passivboxen-Profis schütteln bei diesem Vorschlag sicherlich den Kopf. Doch wenn sie wüßten, wie ein Verstärker aus einer 20 Gramm schweren Membran eine 200 Gramm Membran machen kann, was für kleine Subwoofer erwünscht, dagegen im Mitteltonbereich eher störend ist, dann..... Dazu aber später unter Aktivkonzepten mehr.)

2. Der andere Weg ist der schwierigere. Trotzdem haben nach der Methode schon immer einige Hifi-Fans gute Boxen weiter optimiert. Es ist eine Methode, bei der der Standort der Boxen Zentimeter um Zentimeter verändert wird. Der Ärger mit den Raumresonanzen ist eher schmalbandig, der mit den Wandreflektionen ist dagegen breitbandig. Dazwischen gibt es Bereiche, in denen sich viele dieser Störungen gegenseitig ausreichend kompensieren. Sie können z.B. mit gezielten Auslöschungen durch Wandreflektionen auch störende Raumresonanzen bedämpfen. In Bild 1.35b finden Sie einige Anregungen.

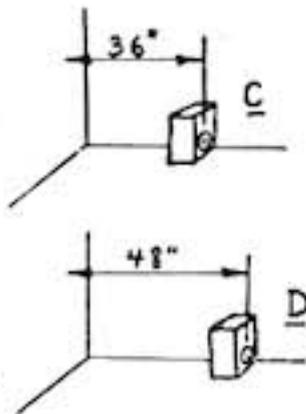
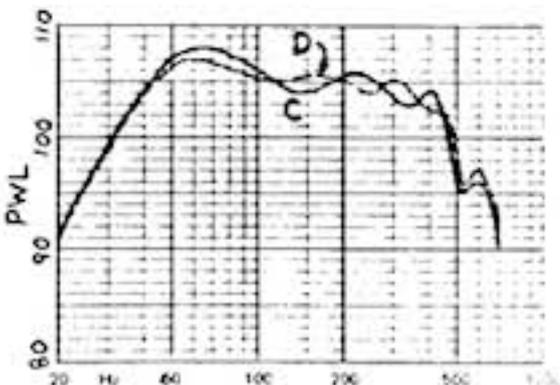
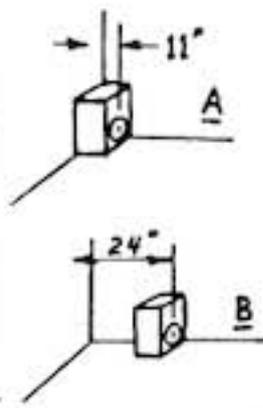
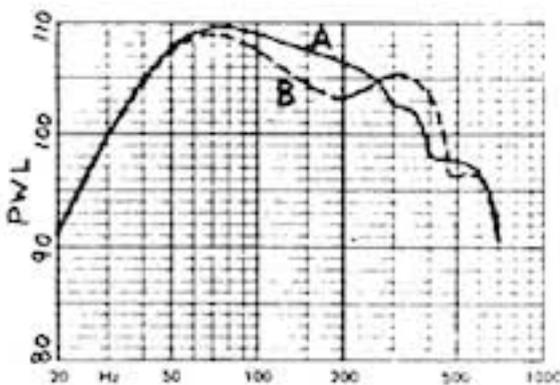
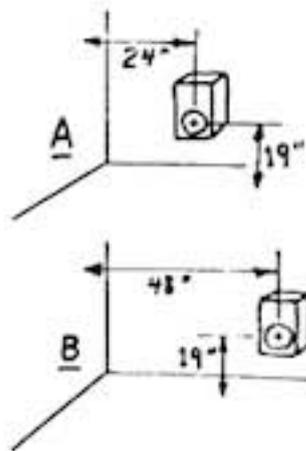
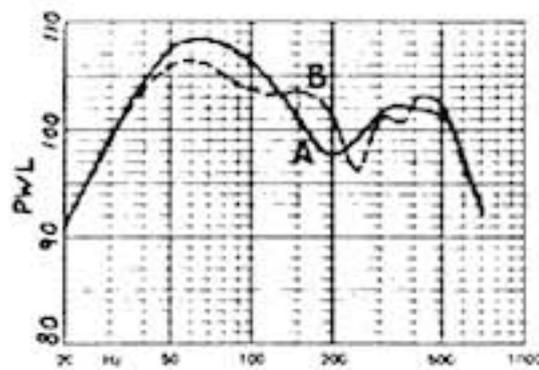
Bild 1.35. Symmetrische und asymmetrische Aufstellung von zwei Lautsprecherboxen nach der Tabelle für l_x , l_y , l_z .

Bild 1.35b. Einige Beispiele für die Einflüsse von Raumwänden auf die Wiedergabekurve einer Lautsprecherbox (nach R.F. Allison).

Es ist zu beachten, daß alle Maßangaben in Zoll eingetragen sind.



35b (Fortsetzung)



Bei der zweiten Methode kommt es tatsächlich auf den Zentimeter an. Treffen Sie eine störende Resonanz exakt mit einer Auslöschung durch Wandreflektionen, dann kann diese Resonanz ebenso wirksam wie mit einem Equalizer unterdrückt werden. Wenn es gleich zwei Raumresonanzen sind, klingt die Lautsprecherbox noch besser. Das betrifft leider nur den oberen Baßbereich. Gegen die untersten Raumresonanzen können Sie mit der Aufstellungänderung nichts unternehmen. In einigen Fällen hilft jedoch ein Kondensator, den man die Zuleitung der Boxen einschleift,

um damit die Tiefbaßwiedergabe und Resonanzeffekte zu verringern. Da die Dimensionierung dieser Kondensatoren jedoch etwas kritisch ist und böse daneben gehen kann (was der Verstärker dann mit einem Totalschaden quittiert), müssen wir diesen Aspekt noch etwas verschieben.)

Sie wollen sich neue Lautsprecher bauen oder kaufen. In diesem Fall müssen Sie entscheiden, ob zwei oder drei Lautsprecher für Sie sinnvoll sind. Außerdem ist es möglich, sich zwischen Passiv- und Aktivboxen zu entscheiden. Für passive Boxen finden Sie eine Tabelle auf Seite 35. Legen Sie mit deren Hilfe die sinnvollste Resonanzfrequenz und den entsprechenden Gütefaktor der neuen Box fest. Der -3 dB Punkt der Frequenzkurve dieser Box (im Freifeld gemessen) sollte dabei etwa eine halbe Oktave über der untersten Raumresonanz liegen. Die richtige Aufstellung gemäß der Tabelle und der Berechnung der störenden höherfrequenten Raumresonanzen sorgt dann für gute Baßwiedergabe bis zur Raumresonanz herab. Versuchen Sie keinesfalls, die unterste Raumresonanz wie eine Schallmauer, so etwas ähnliches ist es ja, mit einer Box mit extrem niedriger Resonanz zu durchbrechen, das geht nicht.

Baßwiedergabe mit einem Subwoofer

Wenn der Raum selbst bei günstigster Aufstellung kein befriedigendes Ergebnis zuläßt, dann sollte man den Einsatz eines dritten Lautsprechers erwägen: den Subwoofer. Verlagern Sie die Tiefbaßwiedergabe aus den Stereo-Boxen in ein externes Baßgehäuse.

Es besteht dann die Möglichkeit, ohne Baßverlust sehr kleine Stereo-Boxen einzusetzen, durch deren höhere Resonanzfrequenz Aufstellungsprobleme deutlich verringert werden. Gerade in großen Wohnräumen, in denen die Lautsprecher zwar gut klingen, aber optisch nicht auffallen sollen, bietet sich diese Lösung an. Leider sind solche Sub-Sat-Kombinationen in der Aufstellung etwas heikel, besonders bei passivem Betrieb ohne elektronische Tricks. Wenn man einen solchen Subwoofer einfach irgendwo im Raum aufstellt, weil der Verkäufer sagte, die Aufstellung sei völlig egal, merkt man sofort, daß es nicht so ist. Der Subwoofer kann die untersten Raumresonanzen anregen. Befindet er sich

z.B. als Beistelltisch getarnt direkt über dem Fußboden, dann macht er das gründlich. (Von einer Eckaufstellung ganz zu schweigen.)

Der Subwoofer hat seinen Platz etwa in der Mitte zwischen beiden Stereoboxen; Sie vermeiden so die Anregung der ersten Resonanz zwischen den Seitenwänden. Er darf auch nicht ganz genau in der Mitte stehen, da er sonst die zweite Resonanz anregt. Er sollte vom Fußboden abgehoben werden, um eine Anregung der ersten vertikalen Resonanz zu vermeiden. (Die zweite fällt meist nicht mehr in seinen Arbeitsbereich, der nur bis ca. 100 Hz hinauf reichen darf.)

Ein kleiner Tip. Ein Subwoofer auf halber Raumhöhe wirkt meist etwas häßlich. Mit zwei Subwoofern, je einen über dem Fußbo-

36

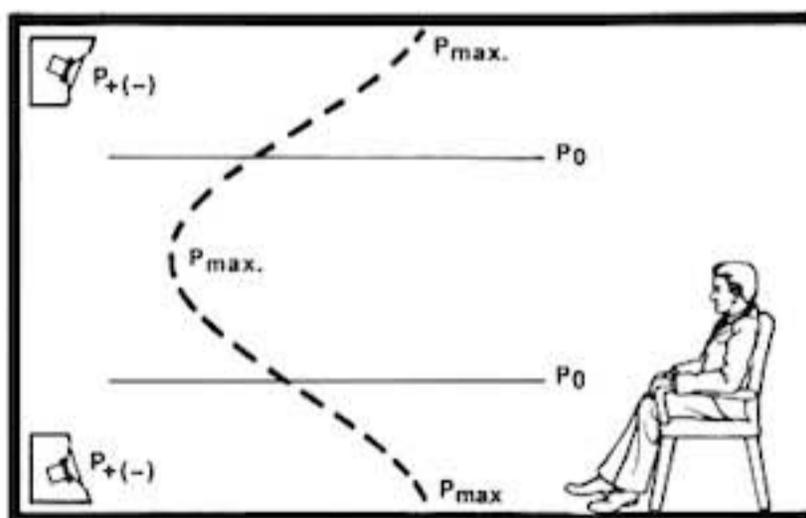
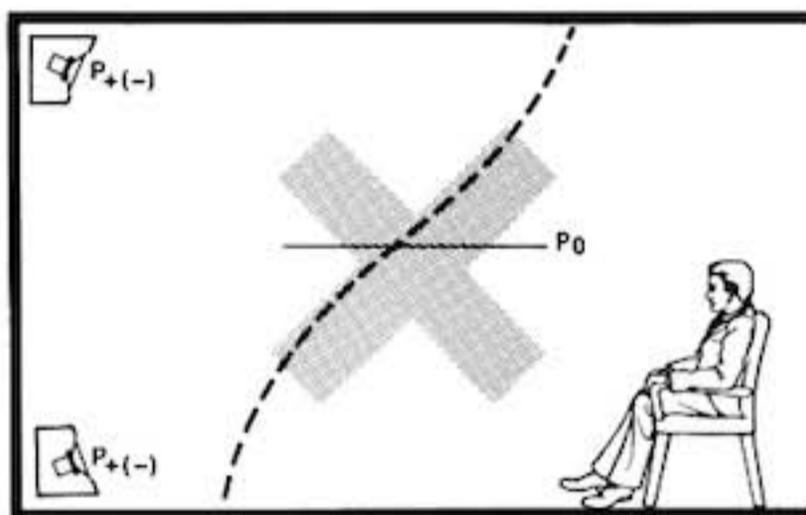
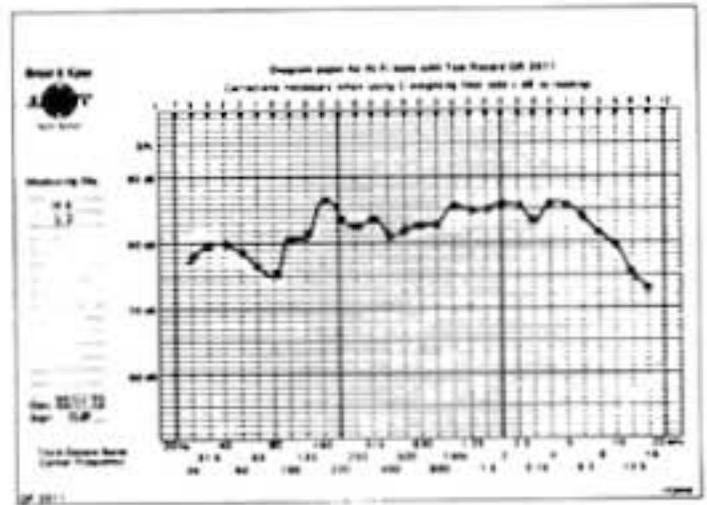
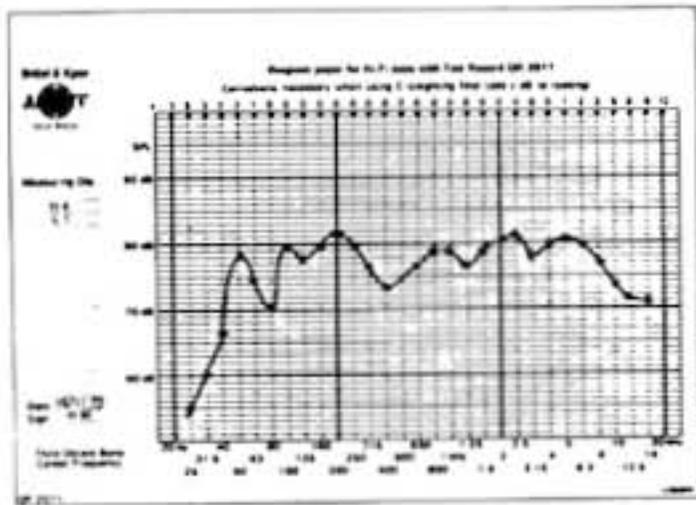
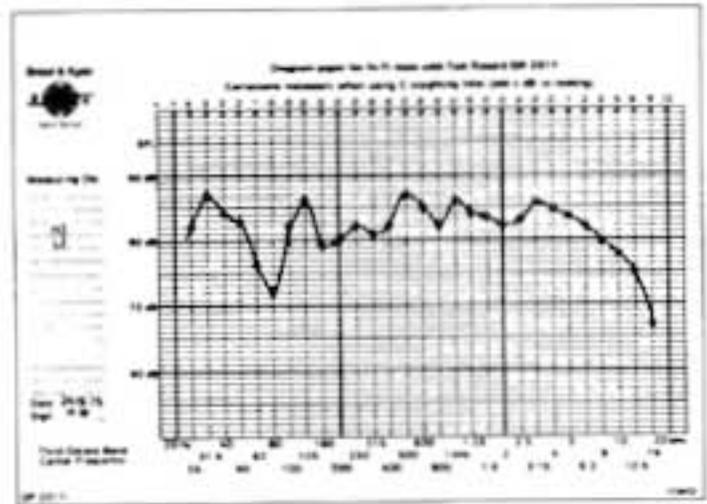
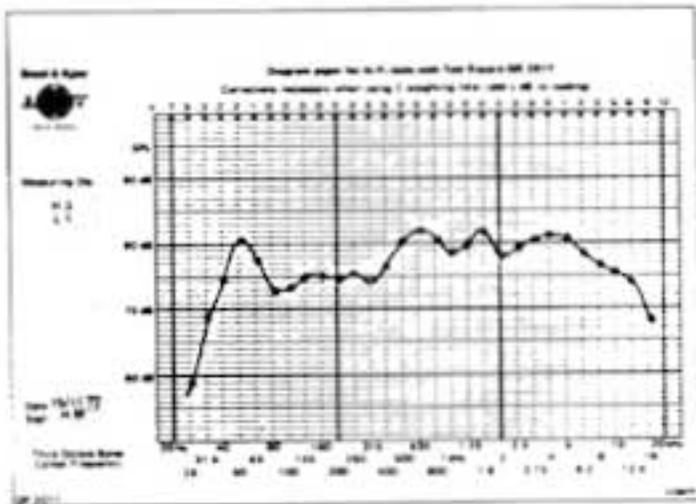
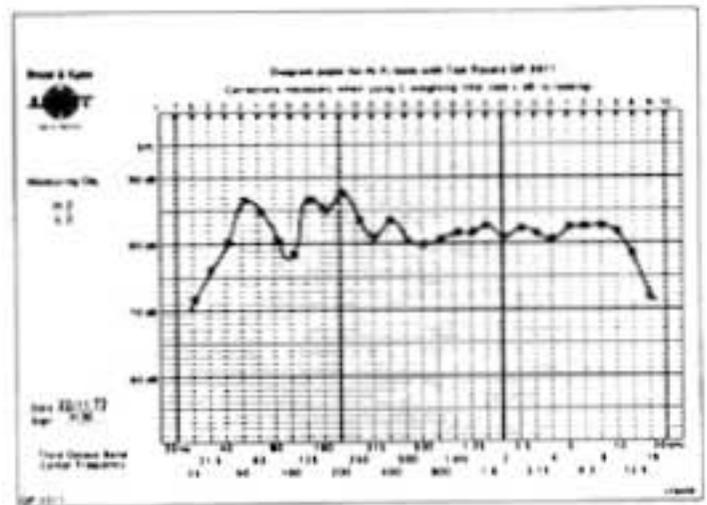
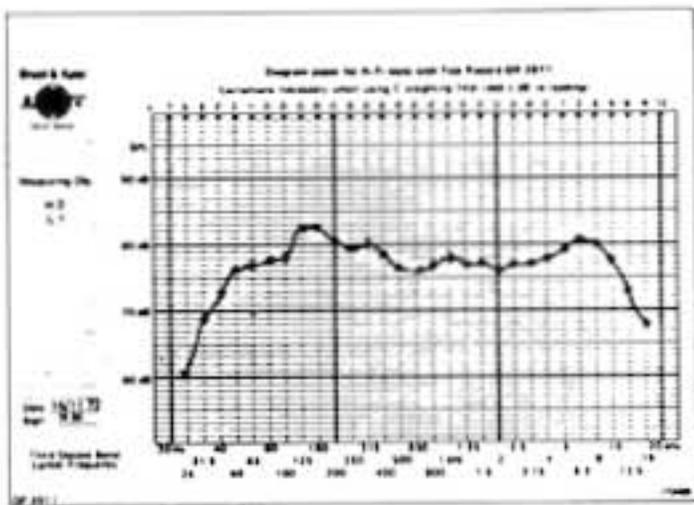
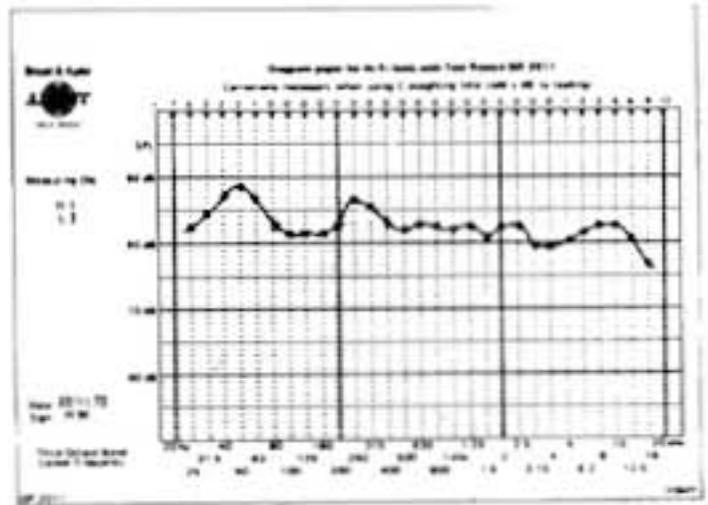
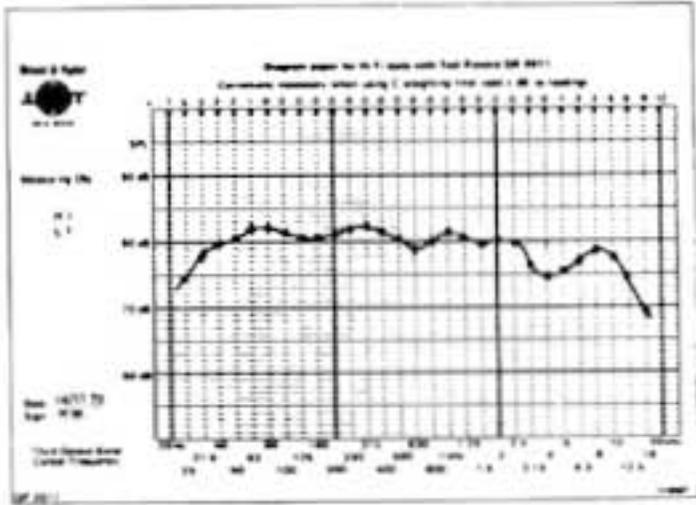


Bild 1.36. Sind zwei Subwoofer gleichphasig angeschlossen, so erzeugen beide die gleichen Über- bzw. Unterdrucksignale. Die erste vertikale Resonanz wird dadurch blockiert. Die Lautsprecher dürfen aber nicht direkt am Boden oder der Decke angebracht sein, sonst wird die zweite vertikale Resonanz angeregt – auch die könnte störend sein.

den und einen unter der Zimmerdecke, kann man die erste vertikale Resonanz ebenfalls blockieren (die zweite leider nicht). Das als Denkanstoß für eigene Konstruktionen.

Falls Sie von vorneherein zwei oder drei aktive Lautsprecherboxen bzw. elektronische Korrekturen einsetzen wollen, dann können Sie auch gleich überlegen, ob es ein etwas tieferer Baß sein darf. Planen Sie schon einmal etwas mehr Membranfläche ein. Sicher fragen Sie sich, ob diese vielen Zeilen zum Thema Baßwiedergabe in Räumen notwendig waren. Angesichts des Stellenwertes der Baßwiedergabe in der Musikkreproduktion sind sie es. Der Baß ist das körperliche Element in der Musik. Ohne gute Baßwiedergabe klingt es einfach nicht, egal wie gut der Rest reproduziert wird. Angesichts der großen Zahl täglich verkaufter Lautsprecherboxen, sind diese Informationen sicherlich nicht fehl am Platz. Im Sinne einer optimierten Baßwiedergabe sind es sicher noch zu wenig. Für eine gute Baßwiedergabe sind Sie selbst gefordert und müssen etwas Arbeit investieren. Nur Sie können diese Arbeit als Freizeitbeschäftigung kostengünstig ausführen. Dabei sind mit etwas Berechnung und Phantasie Ergebnisse möglich, die nicht käuflich sind. Raumakustik ist eine komplizierte Materie. Es ist deshalb auch riskant, etwas darüber zu schreiben. Mehrdeutigkeiten und Fehlinterpretationen sind nie auszuschließen – es heißt dann: ist völliger Unsinn, was da steht. (Daher vermutlich auch die vornehme Zurückhaltung fast aller Autoren und Fachzeitschriften bei diesem Thema.) Aber das Thema lohnt das Risiko, Fehler zu machen. Nur wer informiert ist, kann die Aussagen der Branche richtig deuten, wenn er eine Lautsprecherbox hört. Was nützt dem Käufer die Aussage über den Klang einer Box, bei der es um Nuancen im Mittel- und Hochtonbereich geht, wenn zu Hause der seidige Schmelz bei der Wiedergabe einer Geige (mit dem bescheidenen Marktwert von DM 375.000,-) im akustischen Nebel einer Reihe von Raumresonanzen untergeht? (Um einmal in der Sprache einiger Hifi-Magazine zu sprechen.) Gute Baßwiedergabe heißt zuerst meist einmal weniger Baß. Es wird sicherlich eine Weile dauern, bis Sie weniger Baß als bessere Baßwiedergabe akzeptieren. Doch plötzlich merken Sie, daß es gar nicht weniger Baß geworden ist, da jetzt auch Baßinstrumente auf Schallplatten zu hören sind, von denen vorher wenig da war. Sollte die



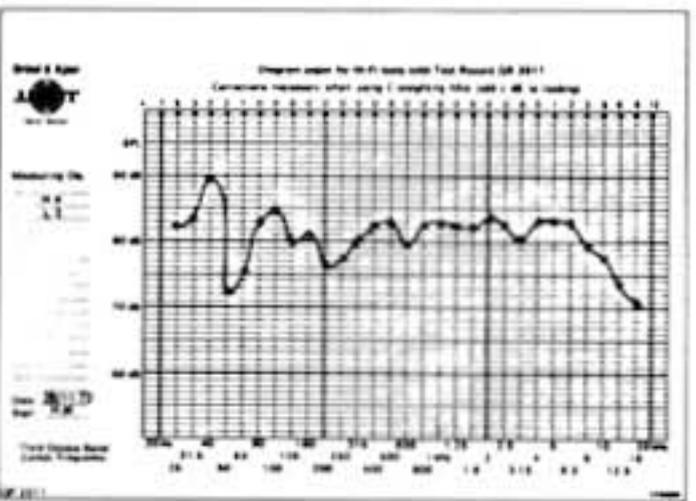
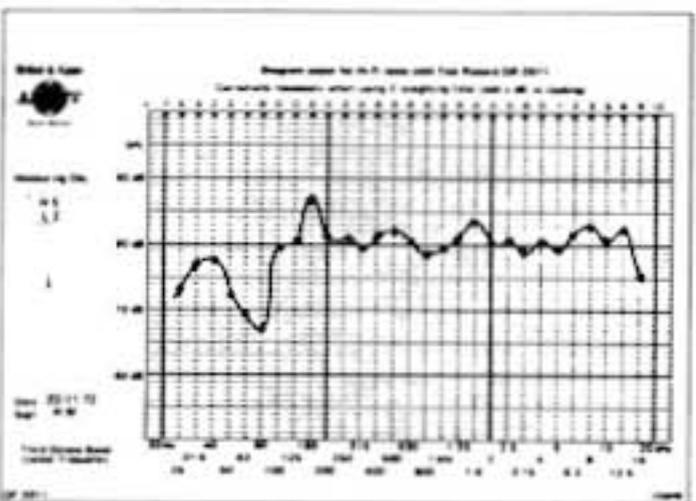
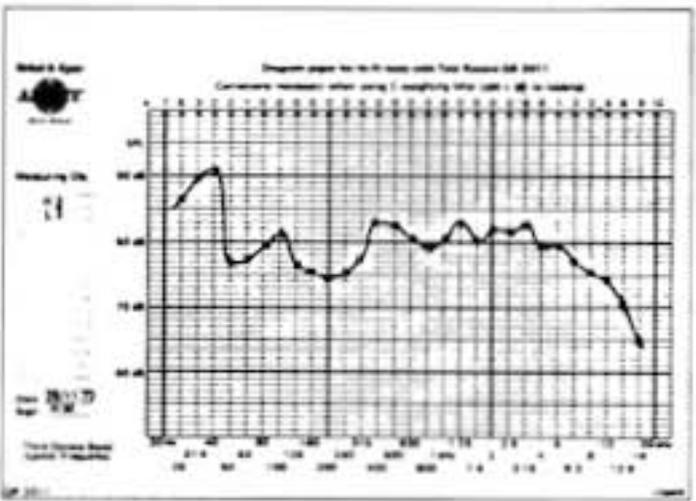
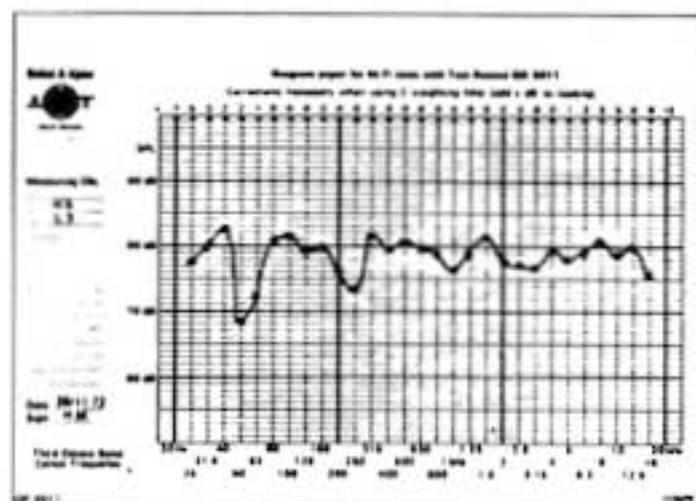
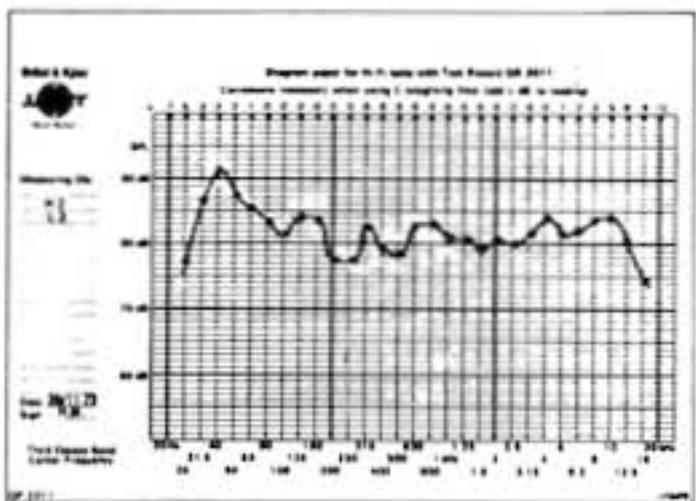
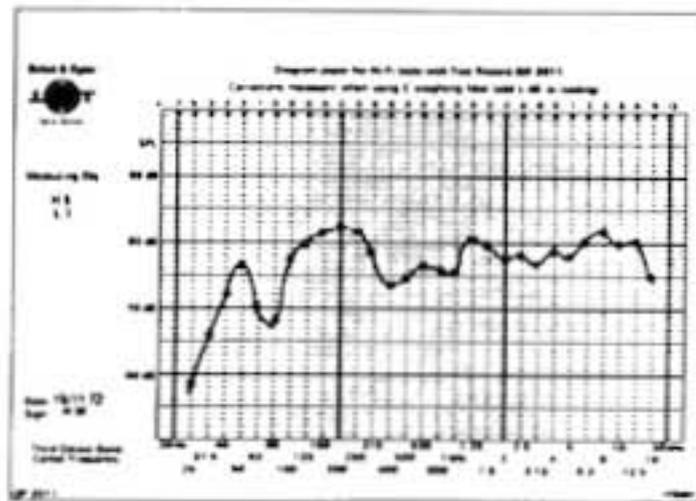
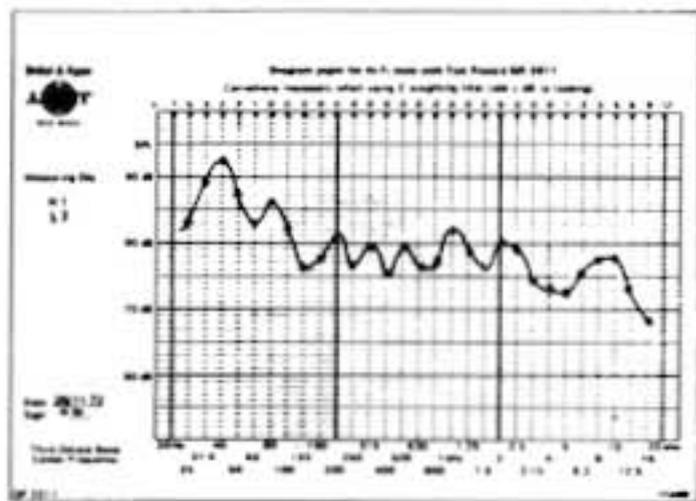


Bild 1.36b. Die Wiedergabekurven von drei verschiedenen Lautsprechern in fünf verschiedenen Räumen (nach Bruel & Kjaer).

Baßwiedergabe bei manchen Schallplatten zu dünn erscheinen, was bestimmt der Fall ist, wenn Sie sehr leise Musik hören, dann kann man ruhig den Baß mit dem Verstärker (oder Equalizer) etwas anheben. Jetzt ist wohl wieder mehr Baß vorhanden, aber mit bestem Impulsverhalten und ohne Löcher im Frequenzgang.

Diese Überlegungen genügen zum Thema Baßwiedergabe, denn die Musik besteht ja nicht nur aus Baß.

Richtcharakteristik und Richtdiagramme

Wußten Sie eigentlich, daß Sie ohne einen Raum die größten Probleme bei der Stereowiedergabe hätten?

Der nachfolgende Text und die Zeichnungen in Bild 1.37 beweisen es. Betrachten Sie zunächst die Zeichnung in Bild 1.37. Es zeigt was passiert, wenn zwei Lautsprecherboxen ein Stereosignal abstrahlen, bei dem Sie eine Schallquelle in der Mitte orten sollen.

Beide Lautsprecher strahlen zur gleichen Zeit gleich laute Signale ab. Diese Signale gelangen an beide Ohren des Hörers, wobei das Signal zum lautsprecherabgewandten Ohr etwas länger unterwegs ist, d.h. es tritt eine Laufzeitdifferenz auf. An jedes Ohr gelangt damit ein direktes und ein umgeleitetes Signal, wobei sich auch hier die Schallfelder überlagern. Als Folge der Auslöschungen und Verstärkungen erhalten Sie am Ohr einen Frequenzgang für Mittensignale, der die Form eines Kammes

hat. Das ist in Bild 1.37a die durchgezogene Linie. Würde man dagegen genau in der Mitte den Frequenzgang mit einem Mikrophon messen, wäre das Ergebnis linear (gestrichelte Linie in Bild 1.37a), da jetzt keine Laufzeitdifferenzen auftreten können.

Die gleiche Messung läßt sich auch mit einem Kunstkopfmikrophon durchführen. Wegen der zwei Mikrophonkapseln ist das Ergebnis wieder ein kammähnlicher Frequenzgang. Das muß zwangsläufig so sein, da die Mikrofone in der Position der Ohren eines Hörers angebracht sind. Auf Grund dieses nichtlinearen Frequenzganges, der eine Folge der räumlichen Trennung beider Meßwertaufnehmer ist, gibt es also auch im Mitteltonbereich Frequenzen, von denen man relativ wenig hört, obwohl es gar nicht so klingt.

Laufzeitdifferenzen mit gleichen Effekten auf den Wiedergabefrequenzgang können auch elektronisch oder durch Reflektoren erzeugt werden. Die Frage ist, ob es Klangunterschiede zwischen der Wiedergabe beider Stereoboxen und der Wiedergabe über eine Box mit Reflektor gibt. Weiterhin stellt sich die Frage, wie die Wiedergabe eines elektronisch manipulierten Signals über eine oder zwei Boxen klingt. Die Antwort lautet: Die Wiedergabe über zwei Stereoboxen klingt, ähnlich wie die Wiedergabe über Box und Reflektor, sehr gut. Wird stattdessen eine Box mit einem elektronisch gefilterten Signal gespeist (Bild 1.37b), das einen kammförmigen Frequenzgang hat, ist sofort eine klangliche Verschlechterung (näselnde Verfärbung) feststellbar! Das gilt auch für die Wiedergabe eines solchen Signals über zwei Boxen.

Warum? Bei der Wiedergabe über Stereoboxen oder Box und Reflektor ist die Schallenergie bestimmter Frequenzen zwar vom Mikrophon nicht direkt meßbar, aber sie ist in den Raum gelangt. Bei der elektronischen Filterung sind diese Frequenzen dagegen nie im Raum angekommen.

Die deutlichen Klangunterschiede zwischen dem ungefilterten und dem gefilterten Signal sind also darauf zurückzuführen, daß das Gehör neben dem Direktschall auch den indirekten Schallanteil der Reflektionen mit dem gleichem Klangergebnis bewerten kann!

Die gerade angestellten Überlegungen lassen nur einen Schluß zu. Die Wiedergabe eines akustischen Signals kann in einem geschlossenen Raum ganz linear klingen (Bild 1.37c),

37

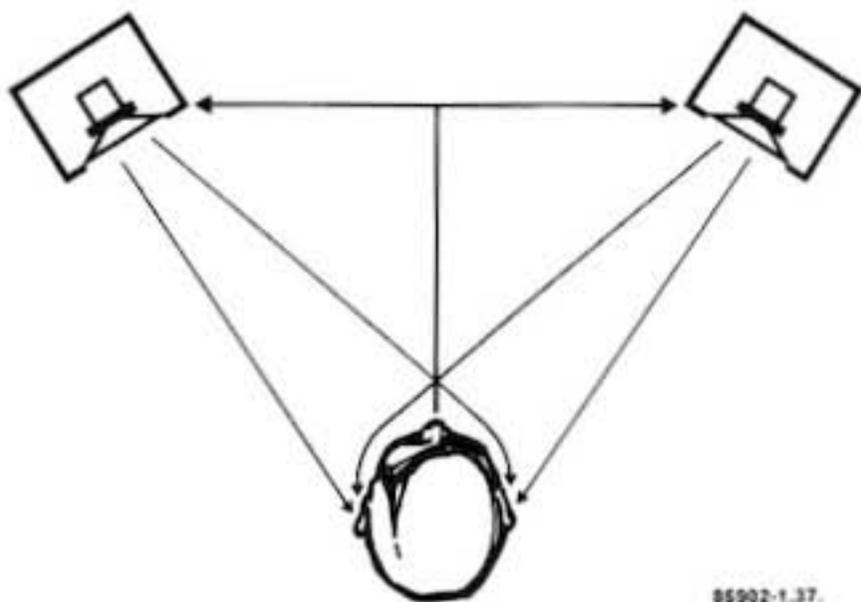


Bild 1.37.

auch wenn zwei Meßmikrofone das Gegenteil behaupten (Bild 1.37b).

Dagegen klingt das wiedergegebene Signal ohne Raum so, wie es die Meßmikrofone bereits angedeutet haben (Bild 1.37b). Diese Überlegungen machen außerdem deutlich, daß die Frequenzkurven, die so gerne an Lautsprechern gemessen und veröffentlicht werden, für die Bestimmung der Klangqualität einer Box bei weitem nicht ausreichen. Sie können sogar völlig falsche Ergebnisse liefern.

Das menschliche Gehör ist ein ungeheuer interessantes und präzises Meßinstrument, weil es bei der Arbeit mitdenkt. Bei der Frequenzgangkorrektur tritt ein Mechanismus in Funktion, der vor langer Zeit als Gesetz der ersten Wellenfront bzw. als Haas-Effekt bekannt wurde. Was ist darunter zu verstehen?

Nachdem die (Schall)Wellenfront eines Signals am Ohr des Hörers angelangt ist, beginnt eine extrem aufwendige Auswertungsoperation des Gehörs. Alle nachfolgenden Schallsignale werden bis zu einer Zeitspanne von 40 Millisekunden daraufhin untersucht, ob sie in Beziehung mit dem ersten Signal (Di-

rechtschall) gebracht werden können oder ob sie neue Signale enthalten, die dann ebenfalls wieder entsprechende Nachuntersuchungen starten. Gehören später einlaufende Signale zum Direktschall, wird dessen Lautstärke nachträglich (das muß man sich einmal vorstellen) erhöht. Gleichzeitig liefert das Gehör eine Information über die Position der Schallquelle im Raum. Es ist deshalb auch möglich, mit nur einem Ohr die Schallquelle relativ genau zu orten. Es handelt sich bei diesem Mechanismus also nicht um einen Maskierungsprozeß, mit dem das Gehör alle verzögerten Reflektionen ausblendet, um die Ortung nicht zu stören (auch wenn selbst einige Fachleute das heute noch hartnäckig behaupten). Genau das Gegenteil ist der Fall! Alle Reflektionen innerhalb einer gewissen Zeitspanne werden zur Verbesserung von Ortbarkeit und Klangqualität (besser Übertragungsqualität) herangezogen.

Das hat für jeden Hifi-Fan mindestens ebenso interessante Folgen wie für die Leute in den Tonstudios. Von ihnen verlangt man möglichst originalgetreue Aufnahmen von jeder Art Musik. Wichtiger sind jedoch die Konsequenzen für den Hifi-Fan. Er kann die Reflektionen im Raum bei richtiger Verteilung positiv klangverbessernd nutzen. Die richtige Verteilung ist allerdings wichtig, um dem Gehör ausreichend indirekten Schallanteil mit der richtigen Verzögerungszeit zu liefern. Allerdings sollte man vermeiden, dem Gehör zu genaue Rückschlüsse auf den eigenen Abhörraum zu ermöglichen. Die folgenden Zeichnungen in den Bildern 1.38.1a bis 1.38.1c machen das deutlich.

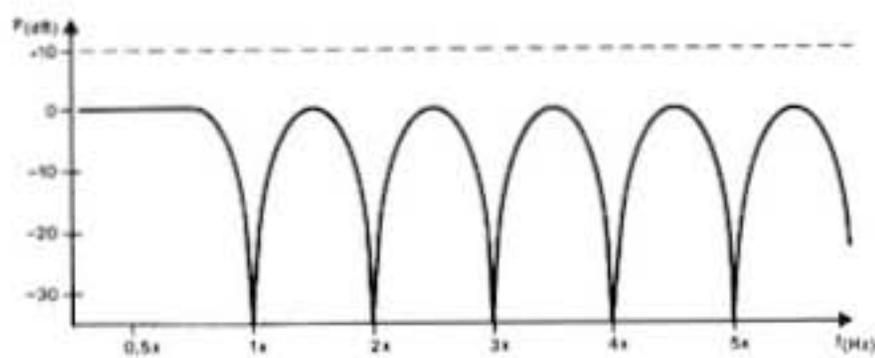
Die schraffierten Flächen kennzeichnen die Richtwirkung der Schallquelle, die als Folge der Gehäuse- oder Chassisabmessungen sowie der Bauart (Kalotte, Horn, Membransystem, Elektrostat, Ionenhochtöner usw.) entsteht.

Die Bilder 1.38.2 vergleichen drei Situationen miteinander, in denen ein von der Lautsprecherbox abgestrahlter kurzer Impuls beim Ohr ankommt.

Im ersten Fall verteilt sich die Schallenergie am Ohr auf den Direktschall und drei Reflektionen. Zwei davon kommen von der Rückseite (was das Gehör sofort registriert, da hohe Frequenzen über die Ohrmuschel abgeschwächt werden).

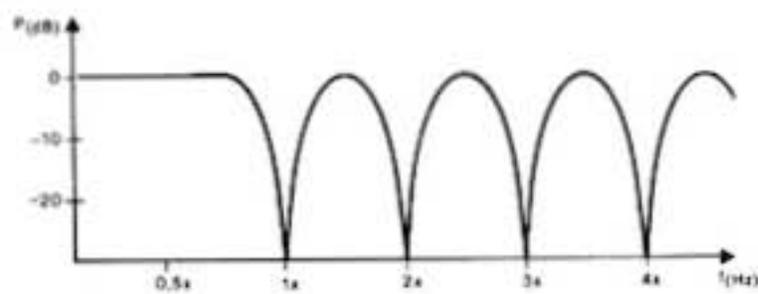
Deutlich besser verteilt sind die Reflektionen

37a



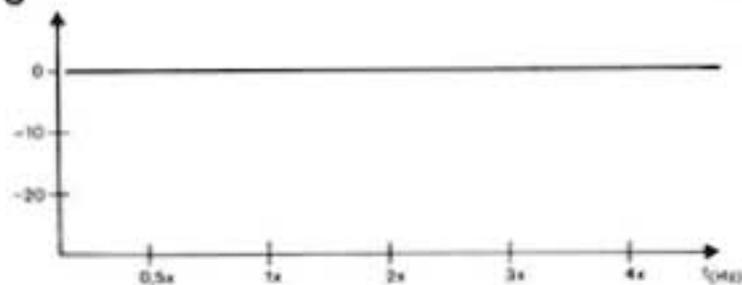
86902/1.37a

b



37b

c



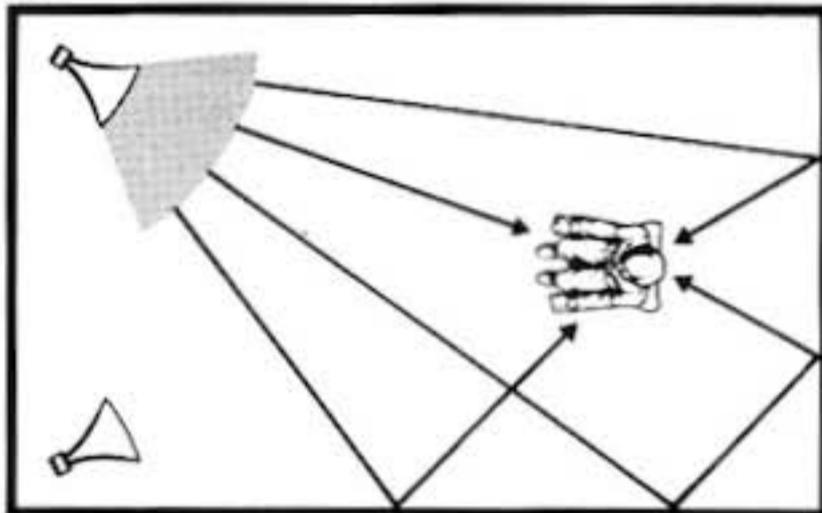
37c

Bilder 1.37a, b und c.

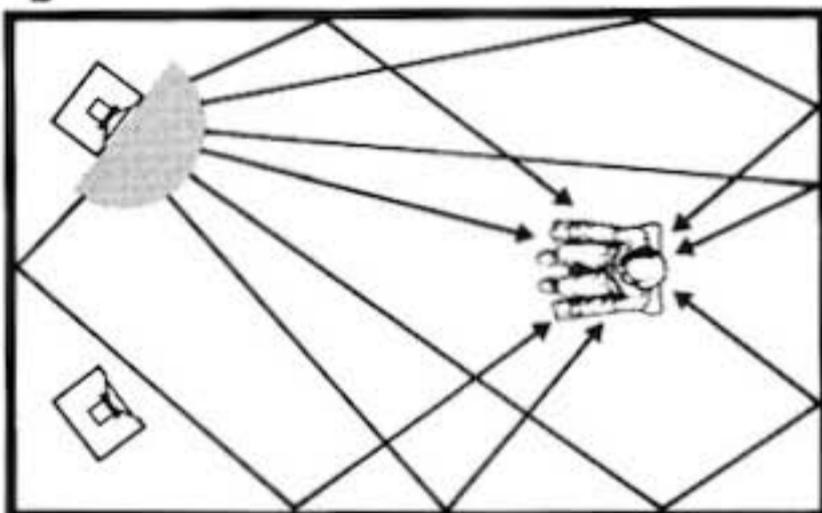
im zweiten Fall. Das Gehör registriert jetzt ähnlich verzögerte Schallanteile aus allen Richtungen.

Im dritten Beispiel ist es des Guten schon fast zu viel. Das Gehör benötigt eine kurze Zeitspanne, um von Direktschallempfang auf die Analyse des indirekten Anteils umzuschalten. Bei zu gering verzögerten Reflektionen ist es besonders bei mittleren und tieferen Fre-

38.1a



b



c

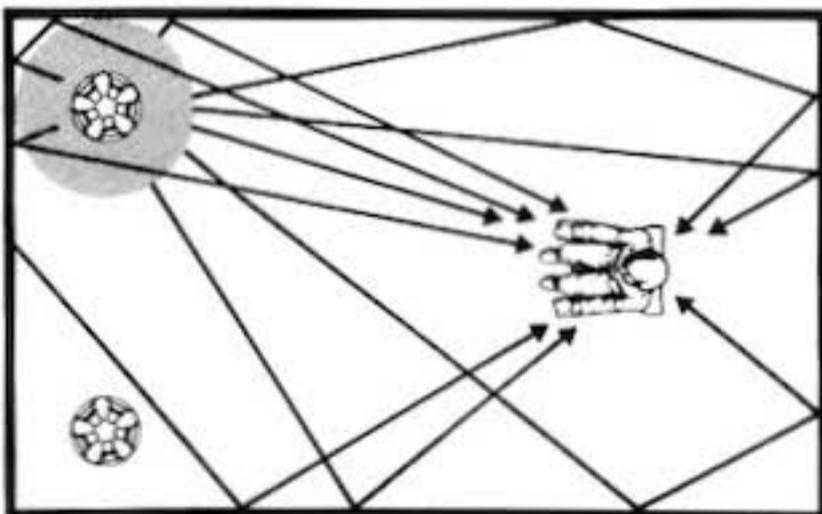
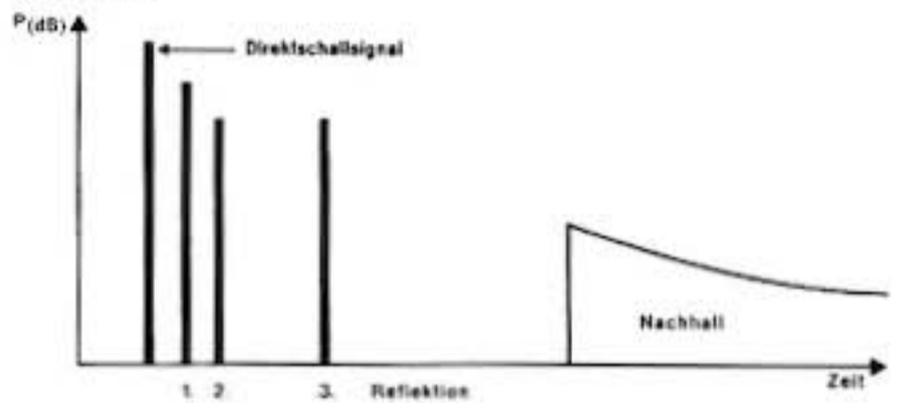


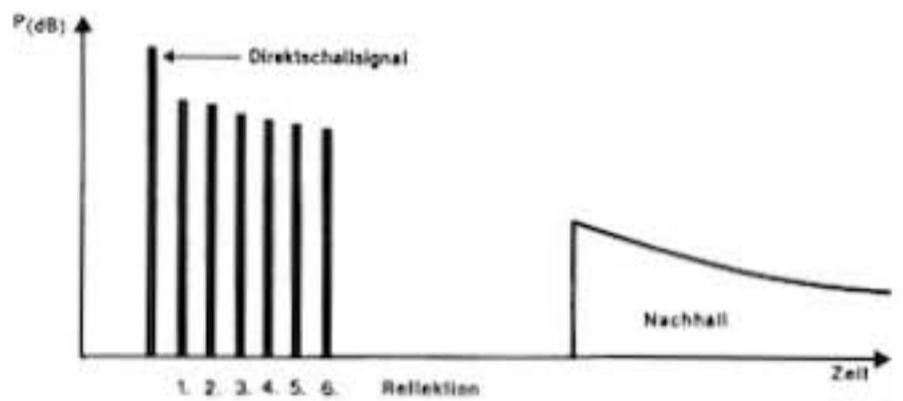
Bild 1.38. Die Verteilung von direktem Schall und den darauf folgenden Reflektionen wird durch die Richtwirkung der Schallquelle bestimmt. Wir haben hier in der Zeichnung die vertikalen Resonanzen bewußt vergessen.

38.2a



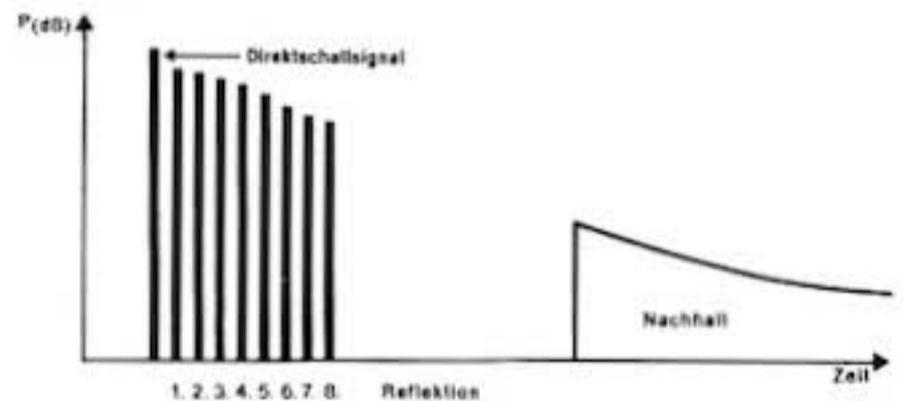
38.2a.

b



38.2b.

c



38.2c.

quenzen nicht dazu in der Lage. Das Gehör vermutet eine andere Direktschallquelle in der Richtung, aus der die Reflexion kommt.

Die Schlüsse, die sich daraus ziehen lassen, sind zwar vielen Hifi-Fans nicht unbekannt, aber nirgendwo genauer erklärt. Lautsprecher mit starker Richtcharakteristik, z.B. Mittel- und Hochtonhörner, große Membranlautsprecher bei hohen Frequenzen, größere Magnetostaten und einige Elektrostaten, können zwar eine sehr gute Detailauflösung des Musikgeschehens liefern (analytisch reproduzieren in der Hifi-Branche), aber sie neigen zu einer näselnden Verfärbung des Klangbildes. Dies deshalb, weil die hohe Richtwirkung in den meisten Fällen keinen ausreichenden indirekten Schallanteil mit kurzen Verzögerungszeiten von 3...10 Millisekunden zuläßt! (Diese Verfärbung klingt wie die durch elektronische Filter erzeugte Verfärbung). Weiterhin kann es

zu Problemen mit der genauen Ortung von Schallquellen in der Nähe der Stereo-Mitte kommen. Dies war vermutlich auch der Grund dafür, daß P.W. Klipsch bereits vor über 20 Jahren den Mittenlautsprecher propagierte. Er kompensierte, zwischen beiden Stereoboxen aufgestellt, den Kammfiltereffekt durch die gerichtete Abstrahlung der Mitteltonhörner. Neben besserer Mittenortung realisierte er so auch verfärbungsfreiere Wiedergabe; Dieser Aspekt ist sicherlich nicht nur für alle Besitzer von Horn-Lautsprechersystemen interessant. Abhilfe können hier nicht nur Mittenlautsprecher, sondern auch zusätzliche indirekt strahlende Lautsprecher schaffen. Deren Klangcharakteristik muß allerdings ähnlich wie bei den vorhandenen Boxen sein; ansonsten hört man es heraus.

Spezielle Diffusoren an den Wänden, wie wir sie aus Konzertsälen kennen, nützen hier nichts. Diese Diffusoren können zwar einzelne harte Reflektionen streuen, aber dafür müssen sie seitlich neben oder vor dem Hörer vom Direkt-schall getroffen werden.

Sie sehen, daß ein Abstrahlwinkel von 90 Grad für gute Hifi-Wiedergabe nicht ausreichend ist. Auch sogenannte Radialhörner mit ca. 120 Grad Abstrahlwinkel sind noch nicht perfekt zu nennen. Sie lassen sich aber mit zusätzlichen Diffusoren in den Griff kriegen und bringen oft senkrecht montiert bessere Ergebnisse als bei der üblichen waagerechten Anordnung. Optisch fällt das Ganze allerdings etwas aus dem Rahmen. Die Studioteknik hat sehr lange an Hornlautsprechern gearbeitet, deren Abstrahlwinkel über einen sehr weiten Frequenzbereich bei 160 Grad liegt. Das nicht ohne Grund.

Die Probleme, die durch zu gering verzögerte Reflektionen verursacht werden, kennen Sie vermutlich schon. Bei vielen Lautsprecherboxen ist die Frontwand mit einem schallabsorbierenden Material belegt. Wenn das entfernt wird, verschlechtert sich die Stereo-Ortbarkeit und die Auflösung der Wiedergabe (allerdings nur bei sehr guten Aufnahmen, bei denen eine Spur von Räumlichkeit vorhanden ist). Die Erklärung dafür liefern die Sekundärschallquellen, die entstehen, wenn eine Schallwelle um ein Hindernis ähnlicher Größe gebeugt (um die Ecke gezwungen) wird. Die Zeichnung (Bild 1.39) verdeutlicht diesen Effekt, der natürlich nicht nur an Gehäusekanten, sondern z.B. bei Regallautsprechern auch

an Büchern in den Regalen auftreten kann. In der unmittelbaren Nähe einer Lautsprecherbox (bis ca. 50 cm) sollten sich also keine schallharten eckigen Gegenstände befinden! Das trifft sich sehr gut mit der Forderung, die die Tabelle für beste Aufstellung zur Baßwiedergabe stellt. In allen Fällen sollten die Lautsprecherboxen ja mit einem bestimmten Abstand zur Wand aufgestellt werden. Die Abstände sind dabei meist größer als 50 cm. Bei der Aufstellung von Boxen mit geringer Richtwirkung in geringer Entfernung zur Rückwand sollte man etwas schallabsorbierenden Schaumstoff (ca. 10 cm dick) neben den Boxen anbringen. So lassen sich die ersten kurz verzögerten Reflektionen vermeiden. Die geringe Richtwirkung kleiner Lautsprecherboxen mit kleinen Frontwänden ist übrigens auch ein Grund dafür, daß diese Boxen bei richtiger Aufstellung so schön räumlich klingen können – berücksichtigen Sie das bitte bei einem Hörvergleich (statt die Boxen bei einem Händler aus dem Regal raus zu testen). High-End: Die besten Ergebnisse erzielen Sie übrigens mit einer großen Zahl einzelner Lautsprecherchassis, die auf einer Kugeloberfläche montiert sind. Optimal ist, wenn sich die Kugel während der Vorführung um zwei Achsen dreht (Bild 1.40). Diese Konstruktion, die für den Privatgebrauch leider viel zu teuer ist, wird deshalb hier nicht weiter betrachtet. Also zurück zu den weniger aufwendigen

39

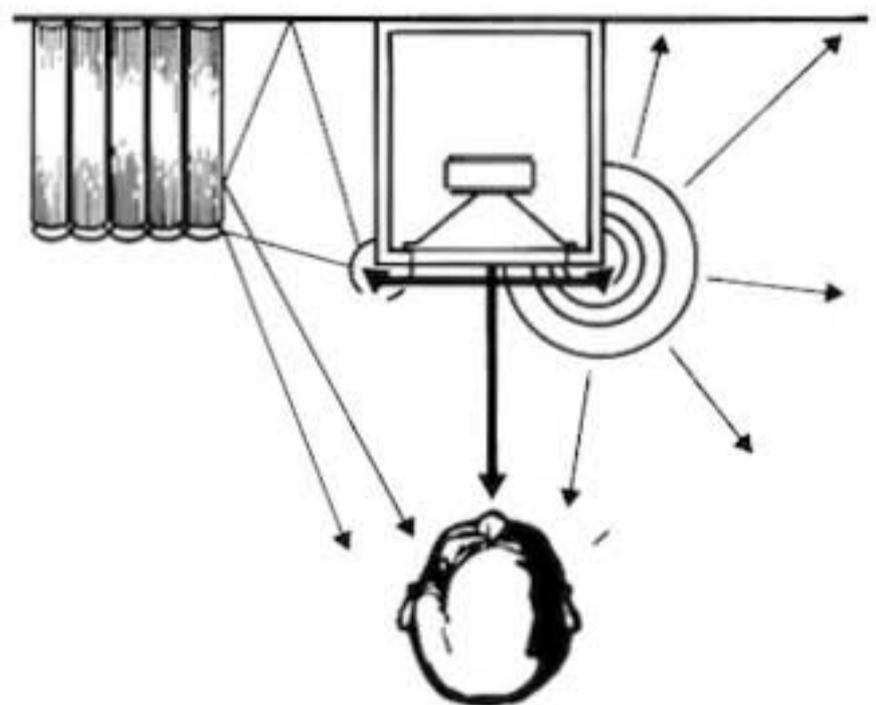
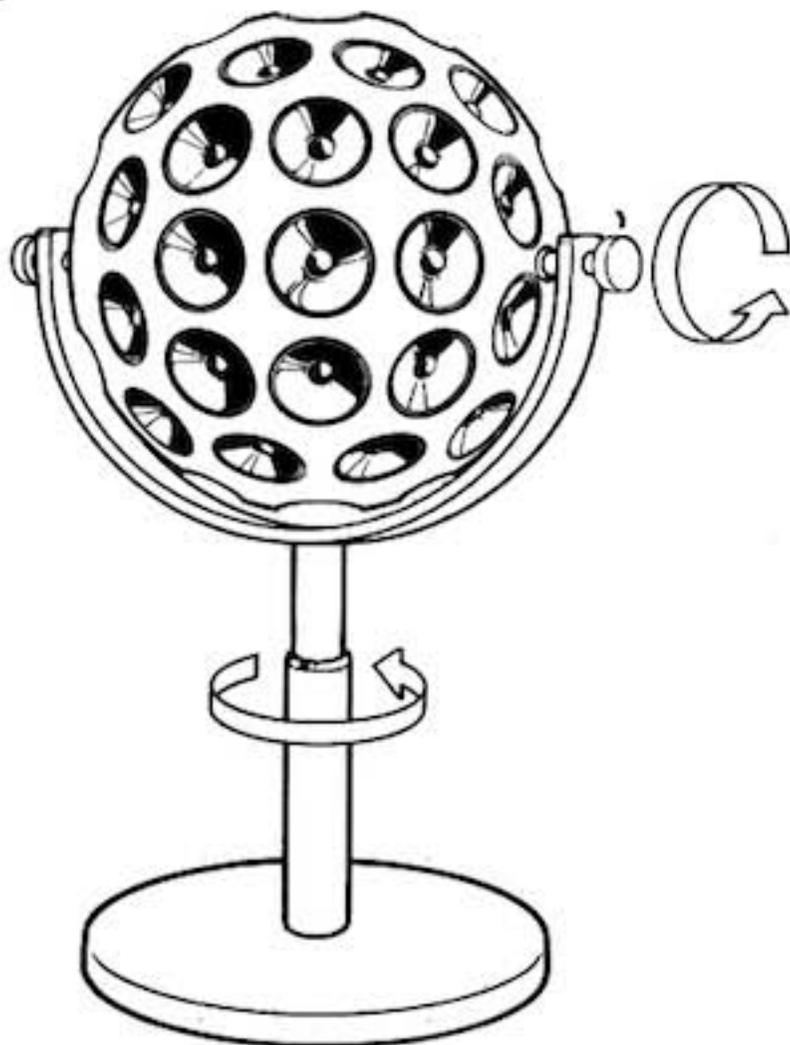


Bild 1.39.

Konstruktionen. Alles, was nicht frequenzunabhängig kugelförmig abstrahlt, hat eine bestimmte Richtcharakteristik. Diese Richtcharakteristik beschreiben seriöse Hersteller durch die mitgelieferten Richtdiagramme ihrer Lautsprecherboxen. Ein Beispiel ist in Bild 1.41 zu sehen.

Hieraus kann man entnehmen, mit welcher Lautstärke eine Box (oder ein einzelnes Chassis) den Schall verschiedener Frequenzen in die verschiedenen Richtungen abstrahlt. Um die Information möglichst kompakt zu halten, befinden sich in einem Diagramm meist Kurven für verschiedene Frequenzen. Dadurch fällt allerdings anfangs die Interpretation etwas schwer. Verlieren Sie sich deshalb jedoch nicht in Details. Wichtig ist ein ähnlicher, gleichmäßiger Verlauf der Kurven für alle Frequenzen über einen Winkel von mindestens 160 Grad (± 80 Grad neben der Hauptabstrahlachse), um bei normaler Aufstellung noch gleichmäßige Reflektionen von den Raumwänden zu ermöglichen.

40

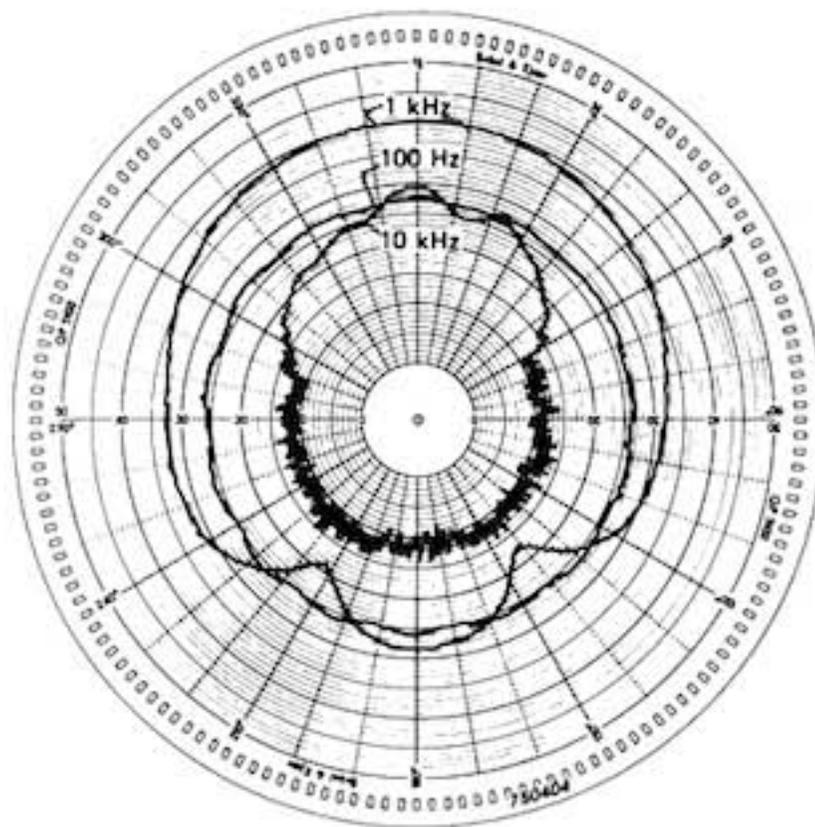


B6902-1.40.

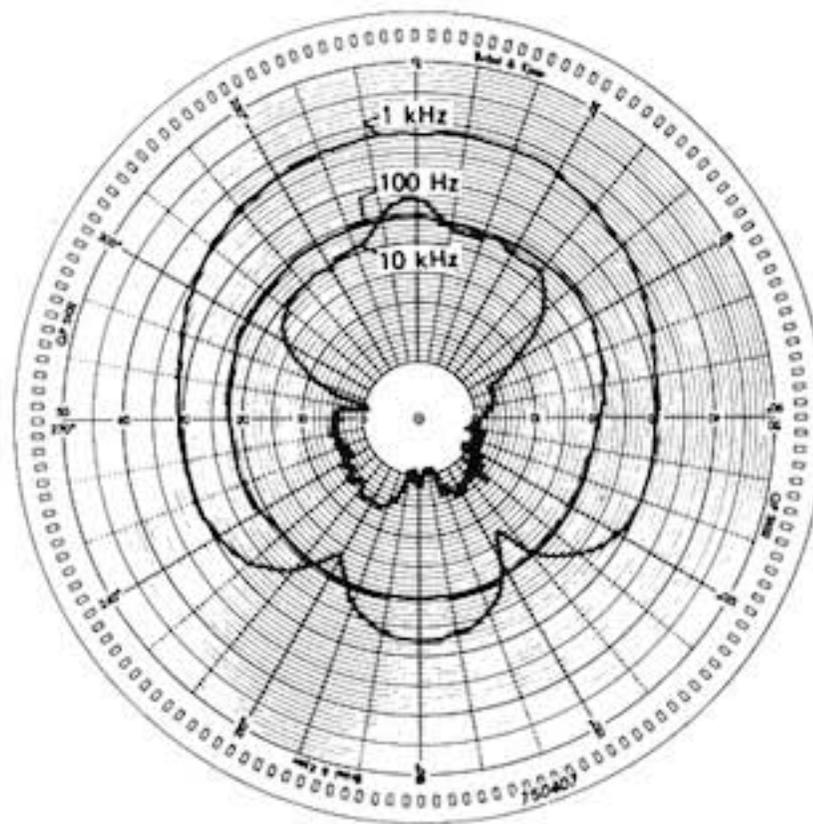
Bild 1.40. Kugel mit vielen einzelnen Lautsprecherchassis, die um beide Achsen rotiert.

46

41

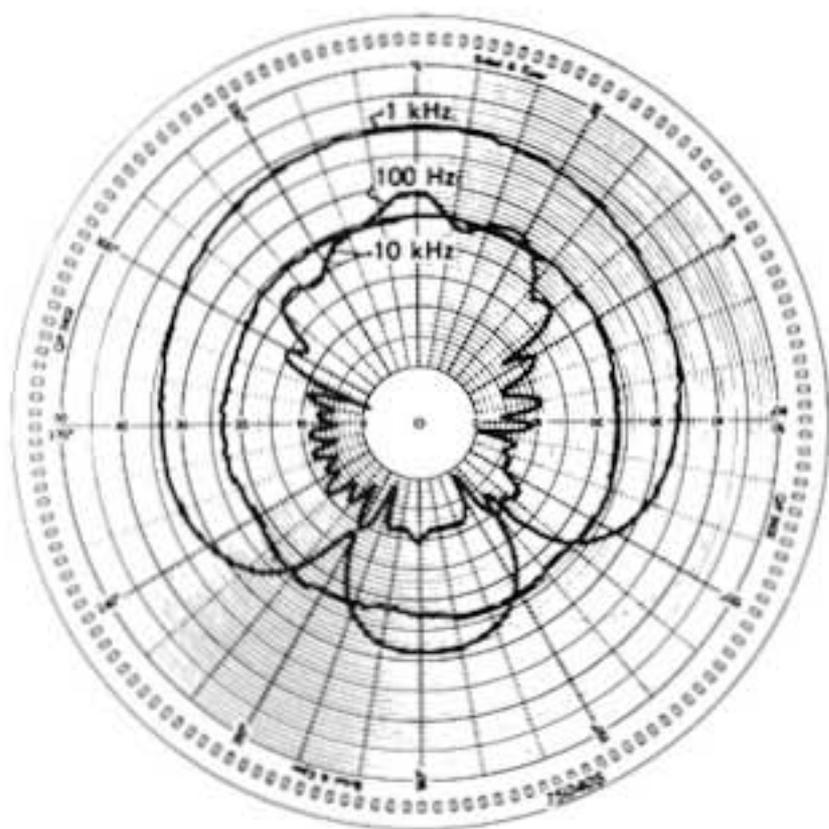


Richtcharakteristiken des gleichen Lautsprechers gemessen mit der Torschaltung in einem gewöhnlichen Raum. Man beachte, daß die 10 kHz-Kurve den Störschallpegel des Raumes offenbart.

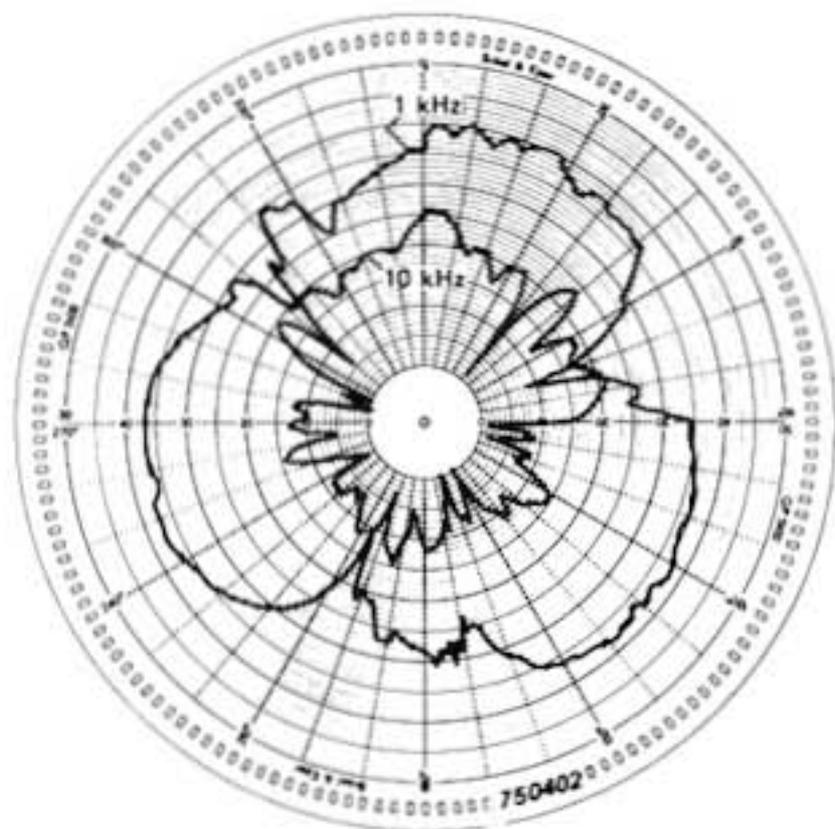


Richtcharakteristiken eines Lautsprechers gemessen mit der Torschaltung im schalltoten Raum. Die scharfen Einsenkungen und Spitzen sind nicht so ausgeprägt wie bei reinem Sinus

Bild 1.41.



Richtcharakteristiken eines Lautsprechers gemessen mit reinem Sinus im schalltoten Raum



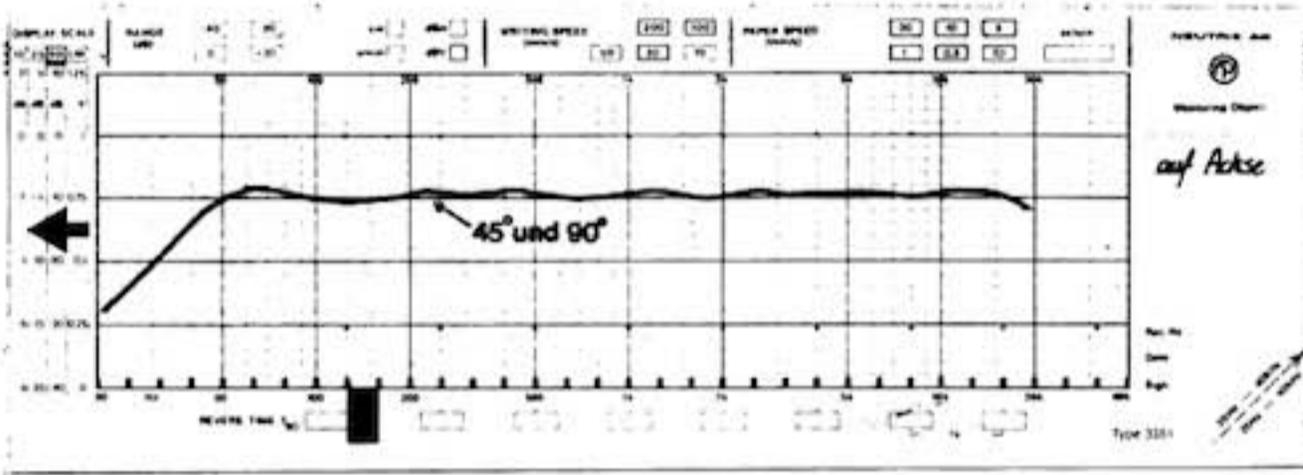
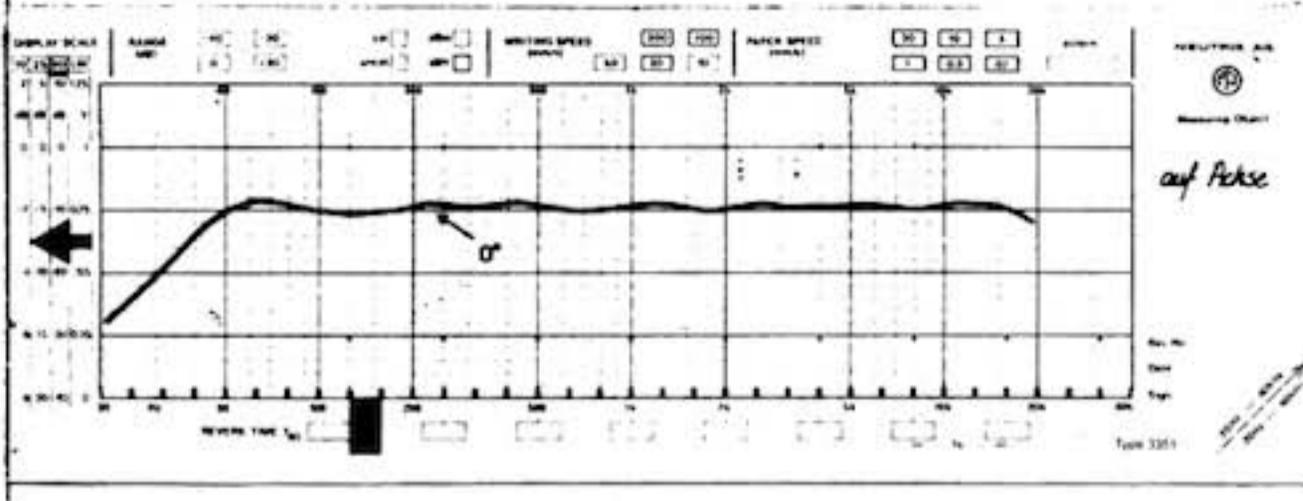
Richtcharakteristiken eines Lautsprechers gemessen mit reinem Sinus in einem gewöhnlichen Raum

Warum sollen die Kurven für alle Frequenzen möglichst ähnlich sein? Fragen wir das Gehör. Die Antwort: Weil ich aus den bereits geschilderten Gründen alle frühen Reflektionen dem Direktschall zuordne. Wenn du freundlicherweise von deiner Box eine Kurve der gesamten abgestrahlten Schallenergie über der Frequenz auftragen würdest und diese Kurve mit dem Frequenzgangschrieb des Herstellers vergleichst, weißt du, was ich meine. Versuchen wir das einmal. Eine gleichmäßig abstrahlende Lautsprecherbox wird natürlich auch eine gleichmäßige Schalleistungskurve erzeugen. Bei einer Richtwirkung in mittleren und/oder hohen Frequenzbereichen sieht das dann so wie in Bild 1.42 aus.

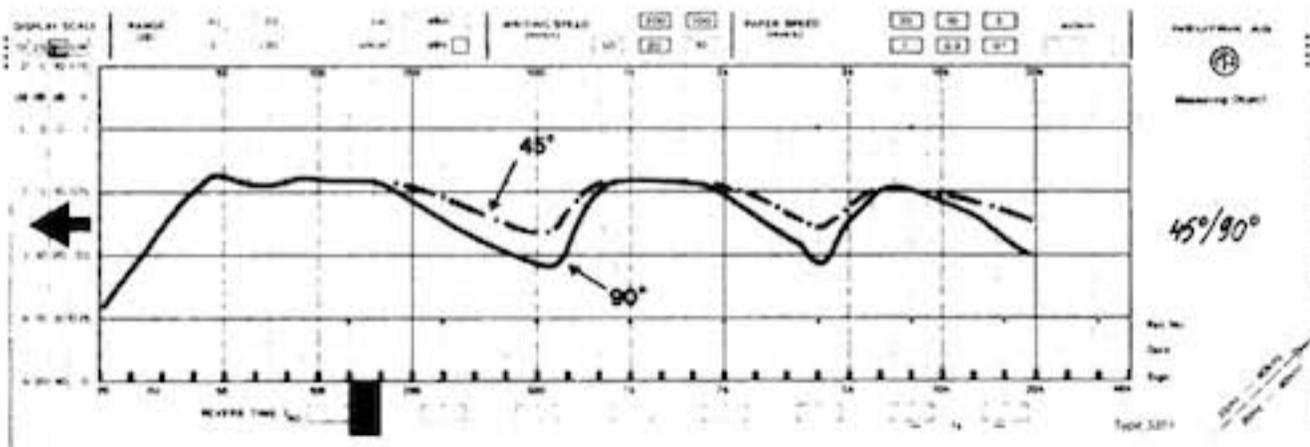
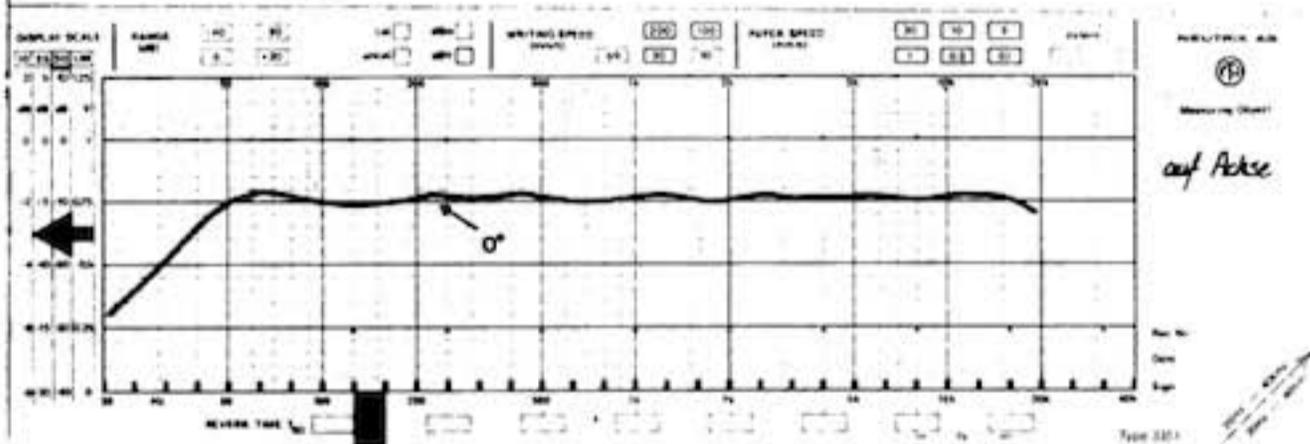
Die Bilder sind eine Erklärung dafür, daß Lautsprecher mit völlig gleichem Frequenzgang oft sehr unterschiedlich klingen. Es ist jetzt ebenfalls klar, warum die sogenannten Frequenzschriebe ohne weitere Information über die Richtcharakteristik der Box nicht allzu ernst zu nehmen sind.

Ein sehr viel sinnvolleres Meßverfahren für Sie (weil die Ergebnisse natürlich nur für Ihren Raum, für die Aufstellung der Box und für die Hörposition richtig sind) ist die modifizierte Gating Technik (Bild 1.43). Die funktioniert so: Der Begriff Gating bedeutet, daß Meßwerte nur innerhalb einer definierten Zeitspanne erfaßt und ausgewertet werden. Das Gate (Tor) bestimmt dabei diese Zeitspanne. Wird jetzt ein Tonburst, das ist eine Folge von Schwingungen einer Frequenz, vom Lautsprecher abgestrahlt, so erreicht er nach einer gewissen Laufzeit (Schallgeschwindigkeit dividiert durch Entfernung) das Meßmikrofon. Das Meßtor wird geöffnet, die Lautstärke des Tonbursts ermittelt. Anschließend schließt das Meßtor wieder. So sind Verfälschungen des Meßwertes durch später einlaufende Reflektionen unmöglich. Sie machen damit praktisch eine Freifeldmessung im Raum (außer bei sehr tiefen Frequenzen, wo der übliche Ärger mit den langen Schallwellen beginnt). Die Gating-Technik ist ideal für Lautsprecherentwickler, die zur Fehlersuche an Boxen nicht immer teure Meßräume anmieten können oder nachts (tagsüber ist es meist etwas zu laut) im Winter Freifeldmessungen durchführen wollen. Um mit dieser Meßmethode jetzt auch Aussagen über den Klang von Lautsprecherboxen machen zu können, muß die Messung etwas modifiziert werden (Bild 1.44). Statt einem Gate

Box 1



Box 2



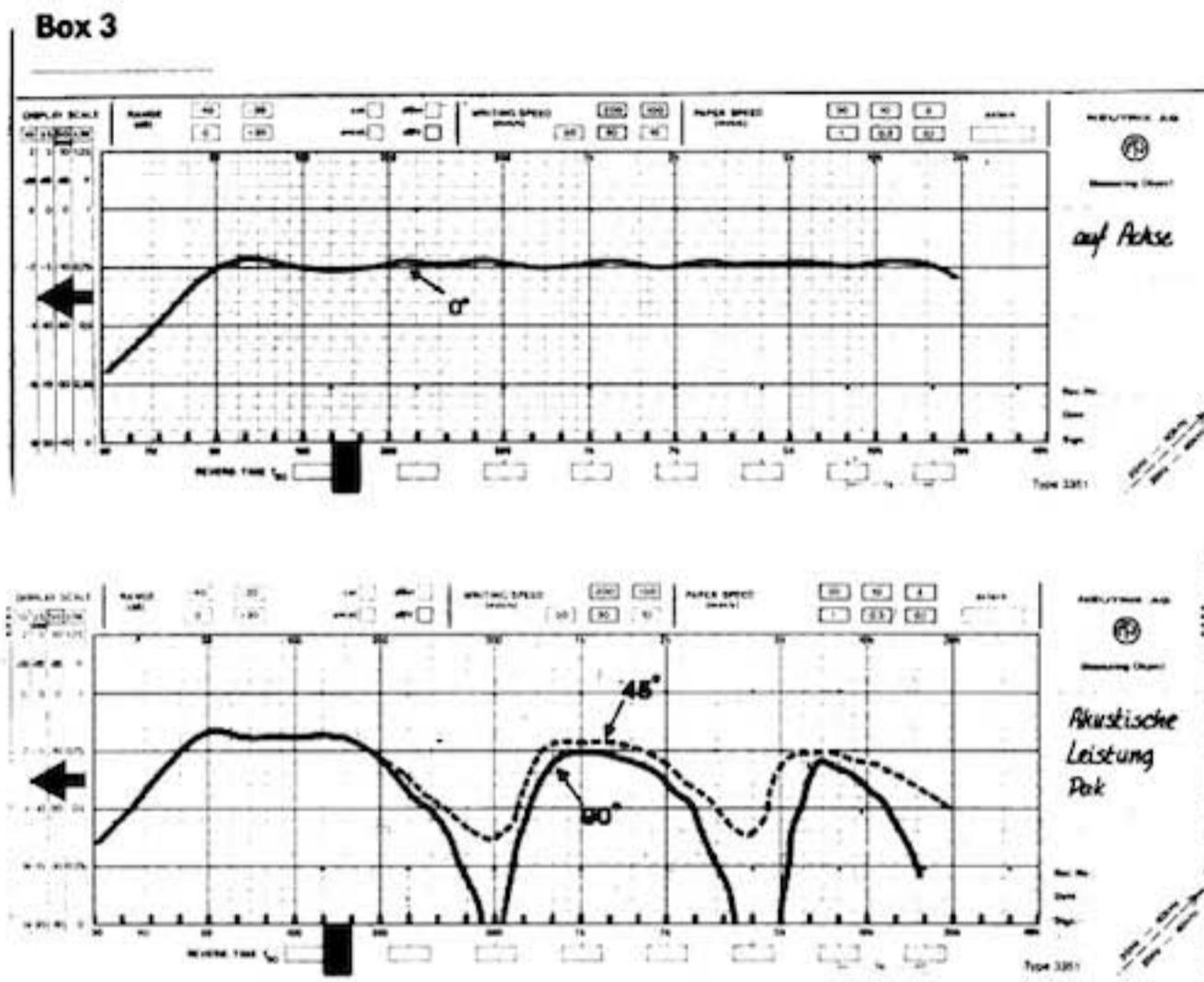


Bild 1.42. Die von den Boxen in den Raum abgestrahlte akustische Leistung P_{ak} über der Frequenzachse.

Für die einzelnen Boxen zeigen die oberen Kurven den Schalldruckverlauf auf Achse; die unteren Kurven gelten für den Schalldruckverlauf seitlich bei 45 und 90 Grad.

werden nacheinander mehrere Meßstore geöffnet, wobei Zeitspanne und Gewichtung der Meßwerte unterschiedlich ist.

Durch die verschiedene Gewichtung von Direkt-schall (erstes Gate) und indirektem Schall (2. und 3. Gate, nach Belieben auch mehr) kann das menschliche Gehör sehr exakt nachgebildet werden. Sie sehen hier beispielsweise, daß später eintreffende Reflektionen lauter sein müssen, um die gleiche Wirksamkeit wie frühere Reflektionen zu erreichen. Es wird zwar immer behauptet, so etwas könne man nicht messen, doch das stimmt nicht. Man kann sehr viel messen, wenn man es nur richtig anstellt.

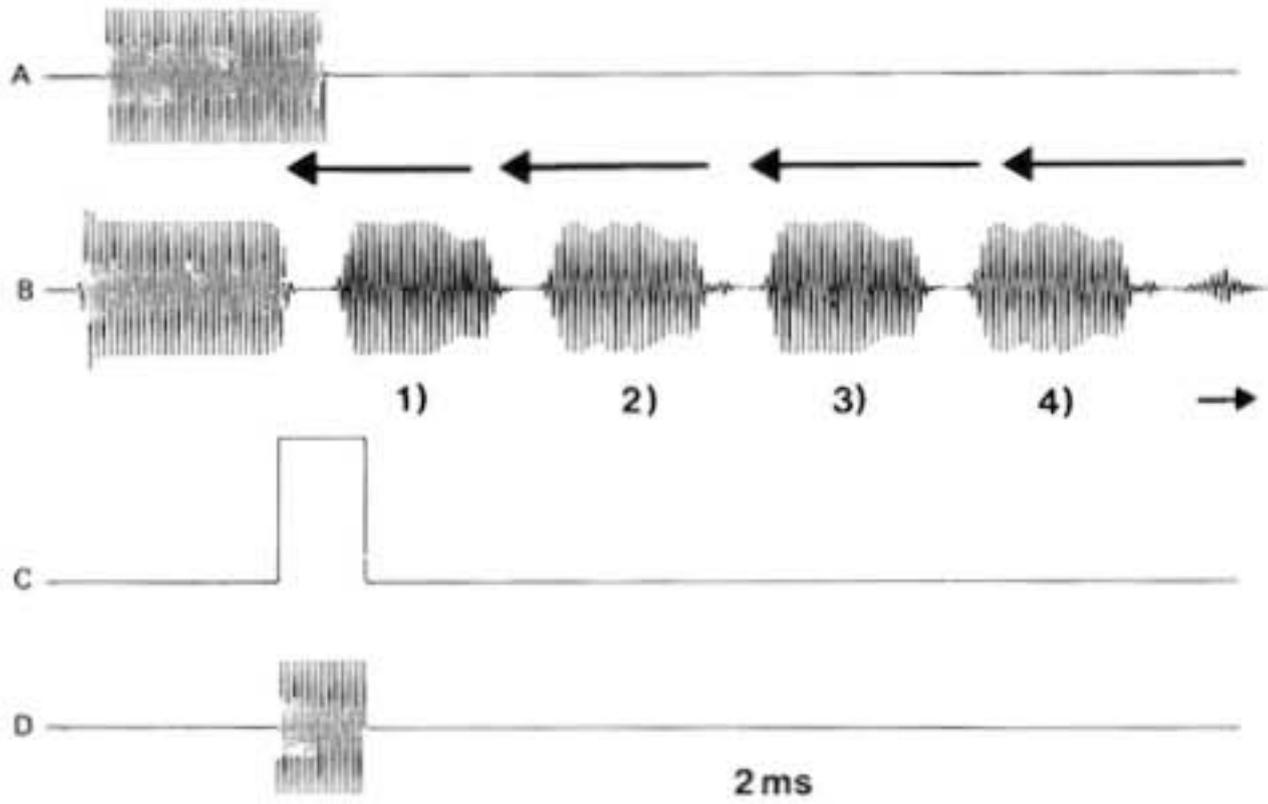
Nun kurz zur Interpretation derartiger Meßwerte. Die Kurven kennen wir bereits aus Bild 1.42; eine ist in Bild 1.45 noch einmal abgebildet.

Keine dieser Kurven ist linear. Das ist auch gar nicht nötig, denn hohe Frequenzen werden in

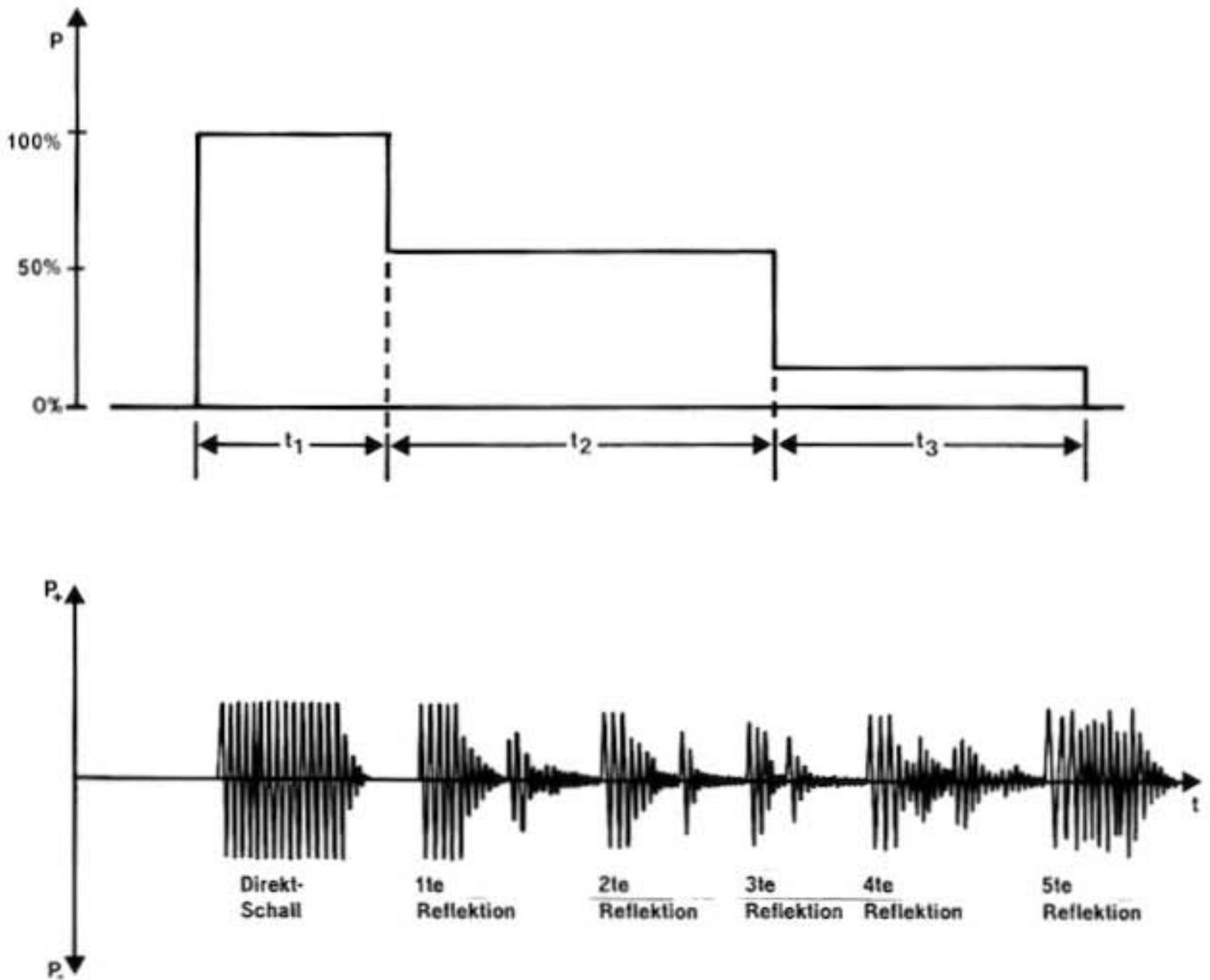
der Luft stärker abgeschwächt als tiefe. Doch leider geschieht das gleichmäßig. Wenn also eine Schallquelle im Mitteltonbereich bündelt und dann wieder breiter abstrahlt, entsteht die mittlere Kurve. Das widerspricht dem Hörvermögen. Hier stimmt also etwas nicht. Ebenso stimmt es nicht, daß die frequenzabhängige Abschwächung der Schallenergie in der Luft den Verlauf hat, der in Bild 1.46 skizziert ist. Es liegen also schon zwingende Gründe vor, Lautsprecherboxen mit gleichmäßigem Frequenzverlauf zu bauen. Ein stärkerer Abfall der Kurve zu hohen Frequenzen ist dagegen eher akzeptabel. So etwas kommt in stark gedämpften Räumen oder beim Orten von Schallquellen um die Ecke öfter vor.

Diese Überlegungen haben ihr Ziel erreicht, wenn sie den einen oder anderen Hifi-Fan zum Experimentieren mit zusätzlichen direkten oder indirekten Schallquellen bewegen. Die indirekten Schallquellen oder Reflektionen sind nämlich unverzichtbare Voraussetzung für gute räumliche Wiedergabe über Lautsprecherboxen. Desweiteren sind Experimente mit Diffusoren nützlich, deren Rolle bei der häuslichen Hifi-Wiedergabe nicht unterschätzt werden darf. Wie bereits erwähnt, kann das Gehör auch Raumreflektionen zur Bestimmung der Position einer Schallquelle heranzie-

43



44



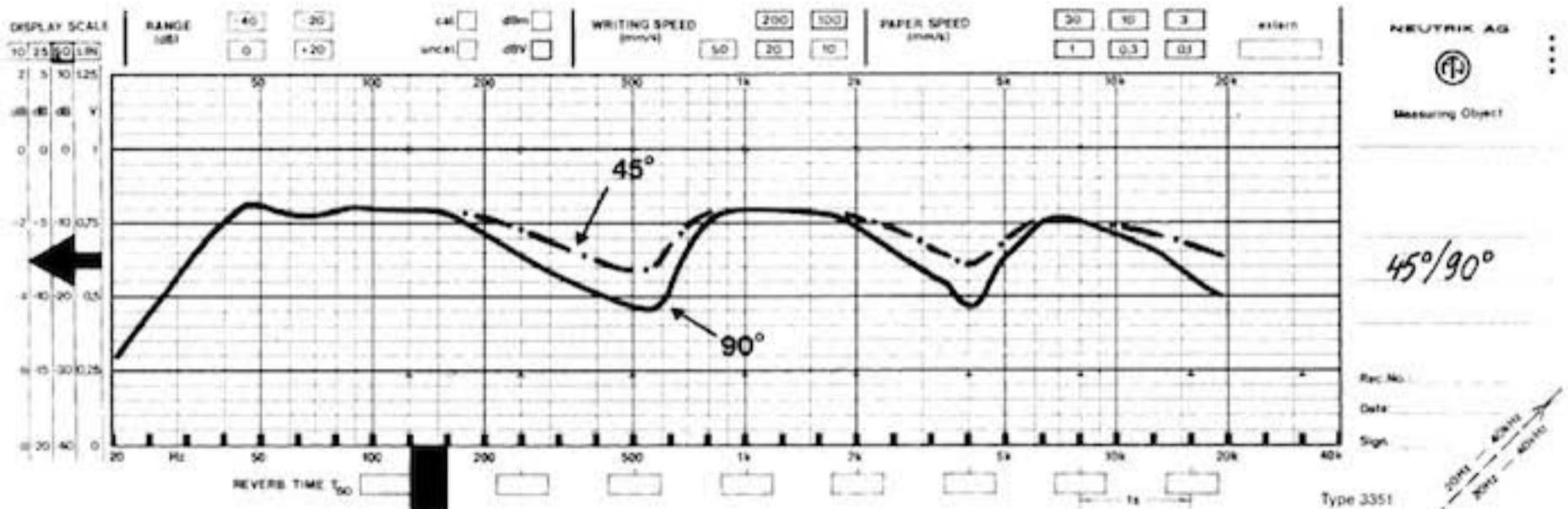


Bild 1.43. Das Prinzip der Gating-Messung.

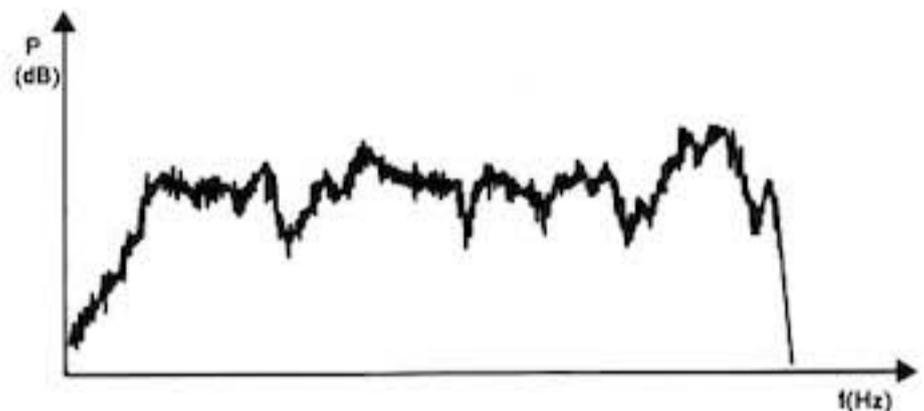
- Ein Tonburst, der zum Lautsprecher gelangt.
- Eine einfache Messung würde auch alle Störgeräusche und Reflektionen erfassen, die das Meßergebnis unzulässig verfälschen.
- Das Gate (Meßtor) ist nur so lange geöffnet, bis der Energieinhalt des gesendeten Tonburst ermittelt ist.

Bild 1.44. Das modifizierte Gate, mit einstellbaren Zeitfenstern t_1 , t_2 usw. sowie mit einstellbarer Gewichtung der Meßergebnisse, kann so justiert werden, daß es der Charakteristik des menschlichen Gehörs entsprechende Meßwerte liefert. Damit werden bei der Messung auch alle Raumreflektionen berücksichtigt.

Bild 1.45.

Bild 1.46. Der Phase-Gating-Diffusor streut einfallende Schallwellen bei der Reflektion sehr gleichmäßig über einen breiten Abstrahlwinkel. So kann Schallenergie von der Zimmerdecke zu den Seitenwänden reflektiert werden, was den Anteil seitlicher Reflektionen verbessert.

46



hen. Gilt das für alle Reflektionen?

Was z.B. ist mit den Reflektionen von der Zimmerdecke? Diese Reflektionen haben fast exakt gleiche Laufzeiten vom Lautsprecher zu beiden Ohren. Auch für den Fall einer virtuellen Schallquelle in der Mitte sind die Laufzeiten völlig gleich. Sehr viel Stereoinformation kann da also nicht drin sein. Die Schallenergie, die in den Deckenreflektionen steckt, fehlt dem Gehör bei der Rekonstruktion des Stereobildes. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn Räume mit hohen Decken eine bessere Stereo-Ortung ermöglichen, da hier die ersten schallstarken Reflektionen immer von den Seiten kommen. In älteren Bauwerken für Musikveranstaltungen waren diese hohen Decken

notwendig, um ausreichend Platz für verbrauchte Luft zu haben. In moderneren Gebäuden gibt es dafür Klimaanlage, hohe Decken sind überflüssig. Die Folge: Mit der Stereo-Ortbarkeit ist es in diesen Sälen nicht mehr weit her. (Es sollen da einige teure Panen passiert sein.) Das gilt auch für die normalen Wohnräume, denn auch hier sind die Zimmerdecken meistens eher niedrig.

Was kann man tun? Absorbieren bringt nichts, denn dann fehlt die Schallenergie noch immer in der Rechnung. Die Energie muß so von der Decke reflektiert werden, daß sie danach von der Seite zum Hörer gelangt. Das gelingt mit einem Diffusor, der eingestrahlte Schallenergie gleichmäßig verteilt reflektieren kann. Das Bild 1.47 zeigt das Prinzip des Schröder Phase-Gating Diffusors, eine der ausgefeiltesten Konstruktionen. Selbst an der Zimmerdecke sieht sie eher wie ein Kunstobjekt und nicht wie ein störendes raumakustisches Werkzeug aus. (z.B. aus Plexiglas).

Es muß natürlich nicht gleich ein solcher Diffusor eingesetzt werden. Auch hier bleibt es Ihrer Phantasie überlassen, wie Sie die Schallenergie von der Zimmerdecke zu den Seitenwänden umleiten.

Es ist doch erstaunlich, welche Betrachtungen über die Klangwiedergabe von Lautsprecherboxen man anstellen kann, ohne sich mit den Lautsprechern selbst konkret zu befassen. Es gibt noch einige Aspekte, die im Grunde vor allen Betrachtungen über Lautsprecherboxen und deren Qualität oder Fehler stehen sollten.

47

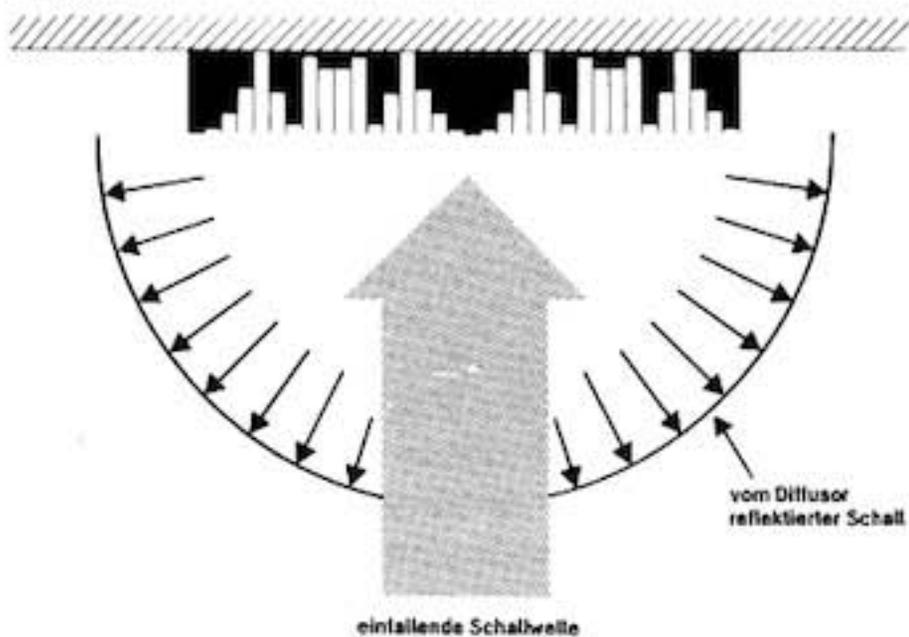


Bild 1.47. Prinzipieller Aufbau eines Diffusors.

Nur zwei Fragen: Wie sieht es denn auf der Aufnahmeseite aus? Welche Aufnahmequalität wird dem Lautsprecher überhaupt angeboten?

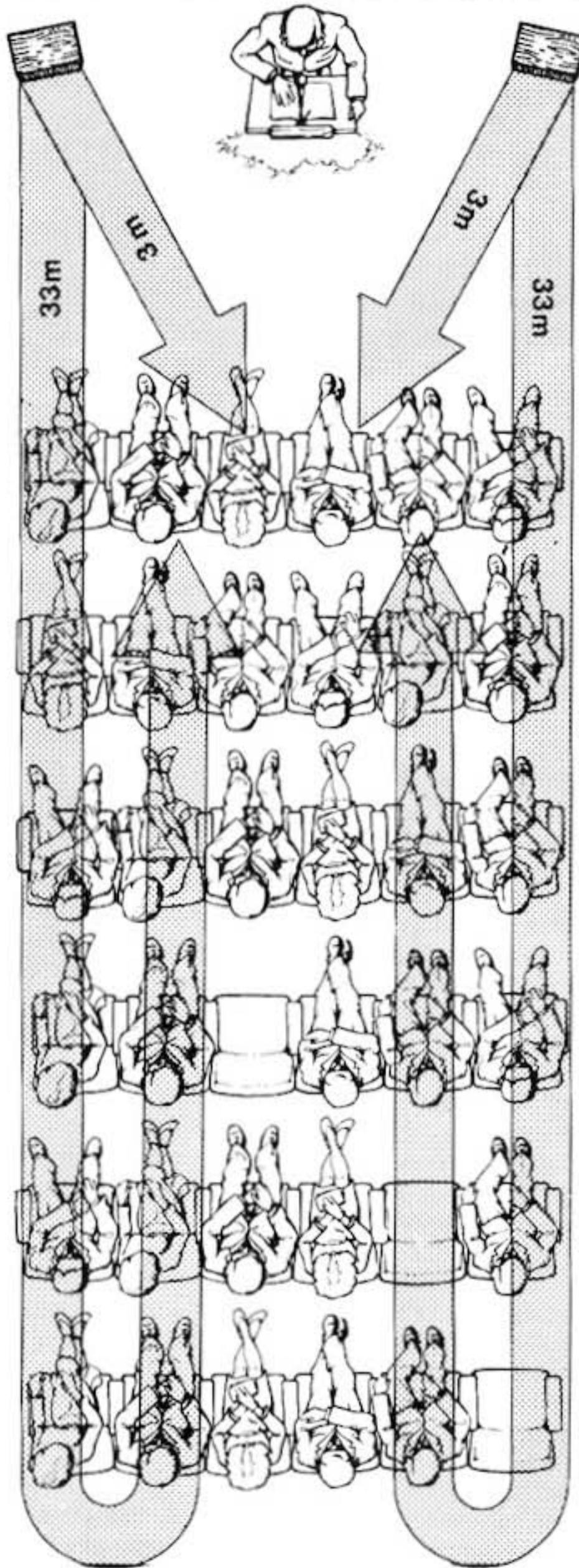
Kein Hifi-Lautsprecher kann mehr aus einer Aufnahme herausholen als sie enthält; Wer beispielsweise viele Schallplattenaufnahmen kennt, weiß selbst, daß darunter nur sehr wenige Aufnahmen sind, deren Klangqualität einen wirklich beeindruckt. Selbst die modernen CD-Player mit ihren Platten bringen nur selten eine gravierende Verbesserung. (In den Anfangstagen der CD-Technologie war es sogar eher umgekehrt.) Warum ist es so schwer, eine gut klingende Musikaufnahme herzustellen? Auch hier ist es wieder das Gehör, dessen Unbestechlichkeit (fast) allen Tontechnikern arge Kopfschmerzen bereitet.

Beobachten wir einmal (im Geiste) einen Toningenieur bei dem Versuch, eine gute Aufnahme von einem Konzert in einem Konzertsaal herzustellen.

Ein Konzertsaal soll auf allen Plätzen die gleiche Lautstärke liefern. Das ist nur möglich, wenn alle Hörer im indirekten Schallfeld sitzen. Im direkten Schallfeld halbiert sich der Schalldruck mit doppelter Entfernung. Das Problem ist es, für alle Frequenzen und alle Plätze ein gleichmäßiges indirektes Schallfeld zu erzeugen, bei dem die (Laut)Stärke der ersten Reflektionen mit größerer Entfernung von den Musikern ebenfalls größer wird. (Das Gehör akzeptiert laute und stark verzögerte Signale ebenso wie leisere, gering verzögerte Signale als Ersatz für fehlenden Direktschall.) Kein Wunder also, wenn gute Akustik im Konzertsaal erheblich schwieriger zu realisieren ist als in jedem Wohnraum. Deshalb sind Vergleiche zwischen einem Wohnraum und einem Konzertsaal vollkommen uninteressant.

Die Abstände von Musikern, Wänden und Zuhörern sind im einem Konzertsaal immer sehr viel größer, als alle Abstände in Ihrem Wohnraum. Dementsprechend stärker sind auch alle Reflektionen, selbst dann, wenn es sich um einen guten Konzertsaal handelt. Wenn der Tontechniker jetzt seine Aufnahme aus dem Zuhörerraum macht, also vom Platz mit der besten Akustik (das muß nicht immer der teuerste sein), dann nimmt er diese lauten Reflek-

Bild 1.48. Entstehung von Flatterechos durch stark verzögerte Reflektionen.



tionen ebenfalls mit auf. Bei einer Kunstkopfaufnahme und Wiedergabe über Kopfhörer klingt alles phantastisch.

Spielt man jedoch eine solche Aufnahme über Lautsprecher ab, dann klingt nichts mehr. Jetzt kommen Musik und alle aufgezeichneten Reflektionen aus der gleichen Richtung, nämlich von dort, wo die Lautsprecherboxen stehen. Das hat unser Gehör vergleichsweise schnell herausgefunden. Da die üblichen Richtungsunterschiede zwischen Direkt- und Indirektschall fehlen, bewertet es jetzt jede Reflektion als Direktschall mit entsprechenden Nachuntersuchungen. Infolgedessen klingt die Aufnahme viel zu hallig und zu undifferenziert.

Wird der Raumhall des Saales durch Richtmikrophone ausgeblendet, stellen sich wieder die Klangverfärbungen durch die Kammfiltereffekte ein. Dadurch werden gewisse Frequenzen nie in Ihren Wohnraum eingespeist. Schwächt man hingegen nur die Reflektionen ab, dann stimmen Lautstärke und Verzögerungszeit nicht überein. So geht es also auch nicht.

Versucht der Tontechniker jetzt entnervt eine Aufnahme im Nahfeld der Musiker zu machen, so hat er das Verhältnis von direktem und indirektem Schall schnell im Griff. Aber jetzt klingen die Instrumente völlig anders!

Nähern Sie sich einmal einem Musiker, während dieser ein Musikinstrument spielt. Achten Sie auf die Klangänderung des Instrumentes. Schon eine kleine Bewegung des Musikers genügt, um den Klang zu verändern. Die Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten ist gegenüber den Lautsprechern wesentlich komplexer. Unser Tontechniker bekommt jetzt einige Arbeit, bis er die günstigsten Mikropositionen gefunden hat. Dazu gehört noch eine ganze Portion Erfahrung. Wenn nun ein Musiker bei einer solchen Aufnahme versehentlich eine falsche Bewegung macht und mit einem Instrument genau in das mühsam ausgerichtete Mikrophon zielt, so stört das die gesamte Aufnahme – sie ist wertlos. Es gibt im Gegensatz dazu auch Aufnahmen, bei denen alles stimmt, doch sind das leider nur wenige.

Sie fragen jetzt sicherlich nach dem Bezug zum Thema Lautsprecher. Ganz einfach: Wenn unser Gehör Reflektionen nicht akzeptiert, weil sie aus der gleichen Richtung wie der Direktschall kommen, dann heißt das nicht, daß das Gehör mit Reflektionen aus an-

deren Richtungen ebensowenig anfangen kann. Bereits mit zwei weiteren Boxen und einem speziellen Verzögerungsgerät zur Erzeugung künstlicher Reflektionen läßt sich eine Räumlichkeit erzeugen, die mit normaler Stereophonie nicht realisierbar ist. Anders gesagt, stellen Sie sich schon einmal auf die Anschaffung mindestens zweier kleiner Zusatzboxen ein. Die Stereophonie über zwei Lautsprecher alleine ist noch lange nicht perfekt. (Diese Zeilen stehen im Sinne einer guten Hifi-Wiedergabe und nicht für einen Dachverband der Lautsprecherhersteller, die gerne noch zwei Boxen an jeden Haushalt verkaufen möchten. Diese Bemerkung nur, um falschen Vermutungen vorzubeugen.)

Das Gehör ist, wie schon mehrmals erwähnt, äußerst kompromißbereit. Nur bei Flatterechos wird es kritisch. Sie erinnern sich sicherlich an das Experiment zu Beginn des Buches. Dort hörte man statt eines Echos zwischen zwei Wänden ein knallartiges Geräusch. Der Abstand von 30 m wurde bewußt gewählt, da sich so eine Verzögerung von ca. 100 ms einstellt. Diese Verzögerungszeit markiert den Grenzbereich, in dem das Gehör von Schwingungsanalyse auf Echowahrnehmung umschaltet. Hier funktioniert nichts mehr. Für eine genauere Analyse kommt das Signal zu spät, für ein Echo zu früh. Das Gehör kann mit solchen (Stör)Signalen überhaupt nichts anfangen, was dazu führt, daß Sie nichts Identifizierbares mehr hören. Darum ist es wichtig, immer nach einem möglichen Reflektionsweg von ca. 30 m zu suchen. Egal ob man in Räumen Musik hört oder macht, aufnimmt oder eine Rede hält, durch jeden 30-m-Umweg kann es unangenehme Verständigungsschwierigkeiten geben.

49

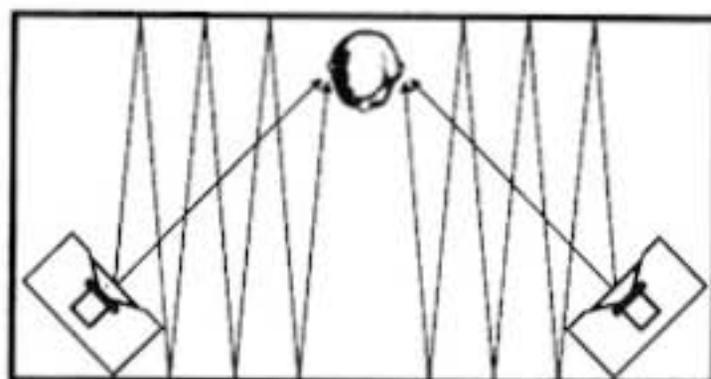


Bild 1.49. Flatterechos können auch bei der häuslichen Hifi-Wiedergabe in kleineren Räumen mit harten Wänden durch mehrfache Reflektion entstehen.

Kapitel 2

Bewertung von Lautsprecherboxen

Neben den bereits in Kapitel 1 erwähnten direkten raumakustischen Ursachen gibt es noch andere Gründe für Verständigungsschwierigkeiten zwischen Lautsprecherboxen und deren Besitzern. Auch die sollte man kennen, bevor eine endgültige Kaufentscheidung zu Gunsten der einen oder anderen Box fällt. Bei der Bewertung von Lautsprecherboxen geht es heutzutage meist um Prozentwerte bzw. um feinste Nuancen der Klangunterschiede. Beim Betrieb einer Lautsprecherbox können dagegen Unterschiede in der Belastung der Box, selbst für gleiche Lautstärken, im Bereich von Zehnerpotenzen liegen! Das jedoch bleibt nie ohne Folgen für den resultierenden Klang der Lautsprecherbox.

Akustische Leistung, Eingangsleistung und Wirkungsgrad

Die folgenden Zeilen richten sich deshalb speziell an die Leser, die Lautsprecherboxen kaufen oder bauen wollen. Dazu ein kleines Beispiel. Sie hören eine kleine Box bei einem Händler und sind vom Klang rundum begeistert. Auflösungsvermögen, Räumlichkeit und Baßwiedergabe sind verblüffend gut. Sie kaufen die Boxen. Zu Hause aufgestellt stimmt dann nichts mehr. Es zerrt im Mittel- und Hochtonbereich, der Baß ist unsauber. Hat der Händler Ihnen etwa andere Boxen eingepackt? Mitnichten. Aber warum klingen sie anders? Wie ist das möglich?

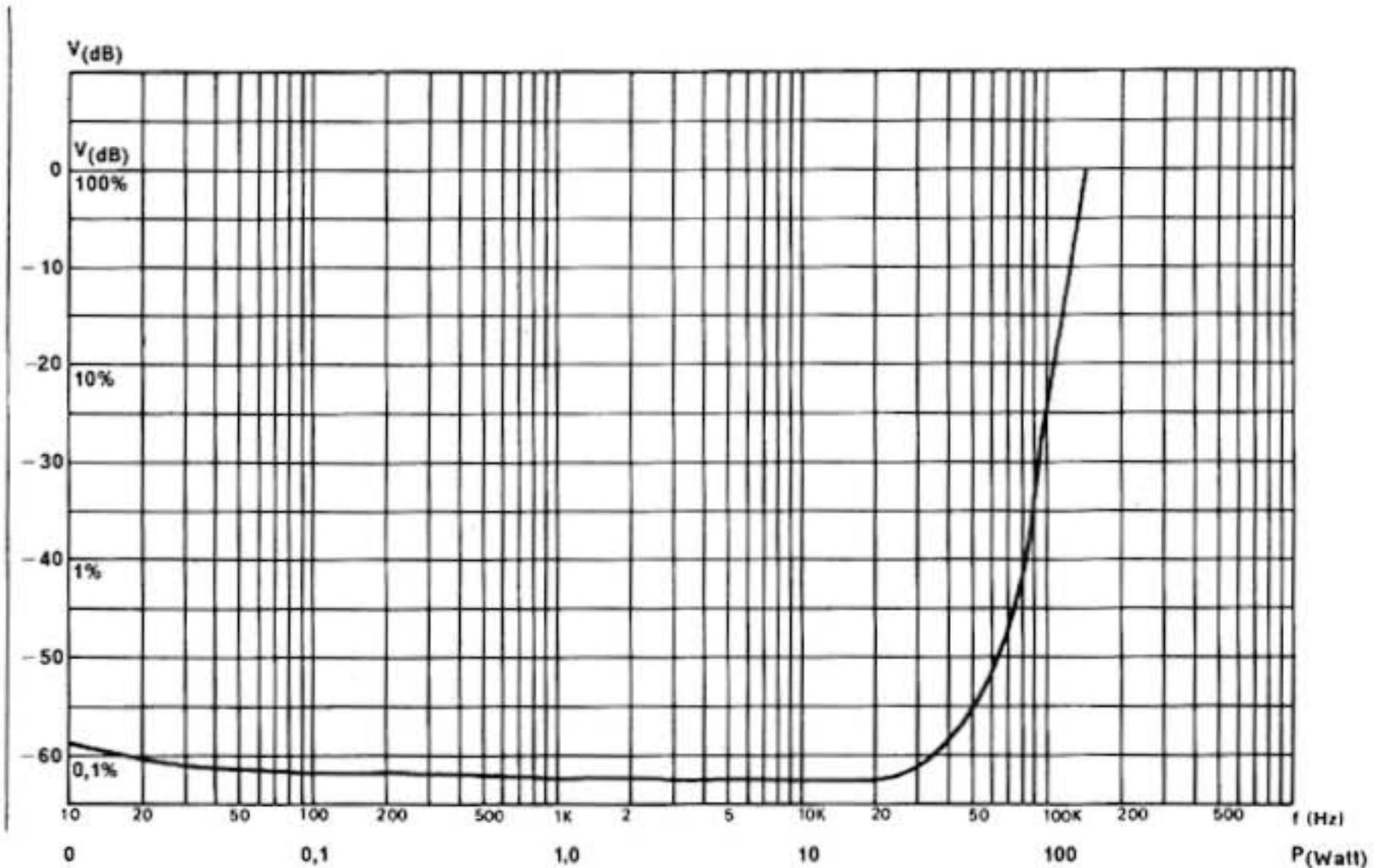
Hier ist die Antwort. Das elementare Problem aller elektroakustischen Wandler liegt darin, daß zur Schallerzeugung etwas bewegt werden muß. Je mehr Schallenergie zu erzeugen ist, um so mehr muß bewegt werden. Das ist entweder eine größere Membranfläche oder eine größere Auslenkung einer kleinen Membran. Damit vergrößern sich auch die möglichen Fehlerquellen der Membran bzw. Wiedergabefehler (Nichtlinearität) der Membranbewegung. Lautsprecherboxen haben ein völlig anderes Leistungs/Verzerrungs-Verhalten als z.B. Verstärker. Das wird deutlich, wenn Sie einen Blick auf die Bilder 2.1 und 2.2 werfen.

Bei geringer Eingangsleistung zeigt die Lautsprecherbox (Bild 2.2) hervorragend geringe Verzerrungen (wir bewerten hier alle Arten von Verzerrung gemeinsam, genaueres darüber folgt noch). Bereits bei einer Steigerung der Eingangsleistung um den Faktor 10 sieht es schon weniger gut aus. Erhöht man die Eingangsleistung noch mehr, hören Sie fast nur noch Verzerrungen. Der Verstärker liefert dagegen von 0...100 Watt fast identische Werte (Bild 2.1). Wenn es ein gutes Exemplar ist, ändert sich auch dann nichts, wenn statt eines Meßwiderstandes eine Lautsprecherbox angeschlossen ist! Ein Tip: Versuchen Sie immer Lautsprecherboxen mit dem Verstärker zu testen, der sie im nachhinein auch betreiben soll. Ein Verstärker kann mitunter sauer auf bestimmte Lautsprecherboxen reagieren, was sich meist in ausgeprägten Verzerrungen einiger Frequenzbereiche äußert. Die Zusammenhänge sind recht kompliziert, aber ein Hörtest schafft hier schnell Klarheit. Damit Sie sich ein Bild von der notwendigen Bewegung zur Schallerzeugung machen können, ist an dieser Stelle die entsprechende Gleichung kurz erwähnt. Zur Schallerzeugung muß eine Luftmenge von einer Lautsprechermembran bewegt werden. Diese ist im folgenden mit V_d (engl. Volume Displacement) bezeichnet. Der Wert für V_d berechnet sich bei geschlossenen Boxen (oder für Mittel- und Hochtonchassis) für eine Frequenz f und eine akustische Leistung P_{ak} nach der Gleichung:

$$V_d \approx 1,5 \cdot \frac{\sqrt{P_{ak}}}{f^2}$$

P_{ak} = akustische Leistung (Watt); das ist die elektrische Eingangsleistung multipliziert mit dem Wirkungsgrad

Der Wert V_d ergibt dabei für eine bestimmte Membranfläche die nötige Auslenkung (in eine Richtung!) oder für eine bestimmte Auslenkung die nötige Fläche. Demnach ist V_d immer das Produkt aus effektiv wirksamer Membranfläche und Auslenkung. Die effektive Membranfläche entspricht dabei der Fläche von Membran plus ungefähr der halben Fläche



86902-2.1.

Bild 2.1. Leistungs-Verzerrungsdiagramm eines HiFi-Verstärkers (P = Ausgangsleistung, V = Verzerrungen).

der äußeren Membranaufhängung.

Ein Berechnungsbeispiel:

Ein 30 cm Tieftonchassis hat bei 12 cm Membranradius und der Hälfte einer 2 cm breiten Membranaufhängung einen effektiven Membranradius von $r = 13 \text{ cm} = 0,13 \text{ m}$. Die effektive Membranfläche ist dann:

$$\begin{aligned} S_d &= r^2 \cdot \pi \\ &= 0,13^2 \cdot 3,14 = 0,053 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

S_d ist die effektive Membranfläche in Quadratmetern.

Die akustische Leistung berechnet sich aus der elektrischen Eingangsleistung und dem Wirkungsgrad des Chassis. Die Herstellerangabe von 92 dB/1 W/1 m entspricht ca. einem Wirkungsgrad von einem Prozent. Wenn jetzt 100 elektrische Watt an das Chassis geliefert werden, so muß bei diesem Wirkungsgrad 1 aku-

stisches Watt abgestrahlt werden. Für eine Frequenz von 30 Hz errechnet sich:

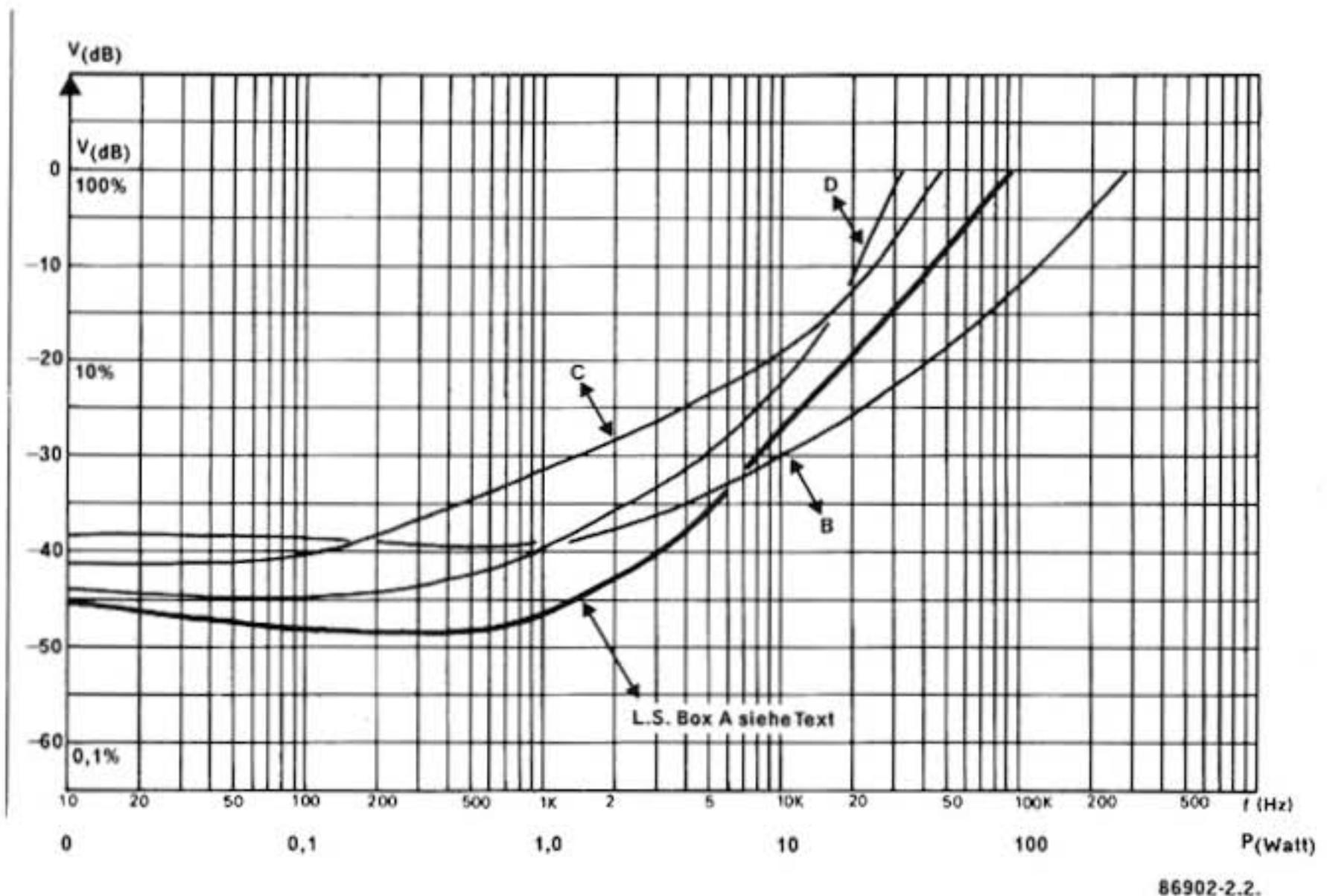
$$V_d = 1,5 \frac{\sqrt{1}}{30^2}$$

Das sind $0,00167 \text{ m}^3$; also 1,67 Liter.

Bei einer Membranfläche von $0,0530 \text{ m}^2$ ergibt sich eine Membranauslenkung X_d in beiden Richtungen von:

$$\begin{aligned} X_d &= \frac{V_d}{S_d} \\ &= \frac{0,00167 \text{ m}^3}{0,0530 \text{ m}^2} = 0,0314 \text{ m} = 3,14 \text{ cm} \end{aligned}$$

Für eine kleinere Membran eines 13 cm Chassis bei einer Eingangsleistung von 50 Watt und 1 Prozent Wirkungsgrad wären es hier:



86902-2.2.

Bild 2.2. Leistungs-Verzerrungsdiagramme verschiedener Lautsprecherboxen.

$$V_d = 1,5 \cdot \frac{\sqrt{0,5}}{30^2}$$

$$= 0,00118 \text{ m}^3$$

Das sind 1,18 Liter Luftmenge, die bewegt werden müssen. Die Membran des kleinen Chassis hat eine effektive Fläche von ungefähr $0,009 \text{ m}^2$. Das ergibt eine notwendige Membranauslenkung von:

$$X_d = \frac{0,00118 \text{ m}^3}{0,009 \text{ m}^2}$$

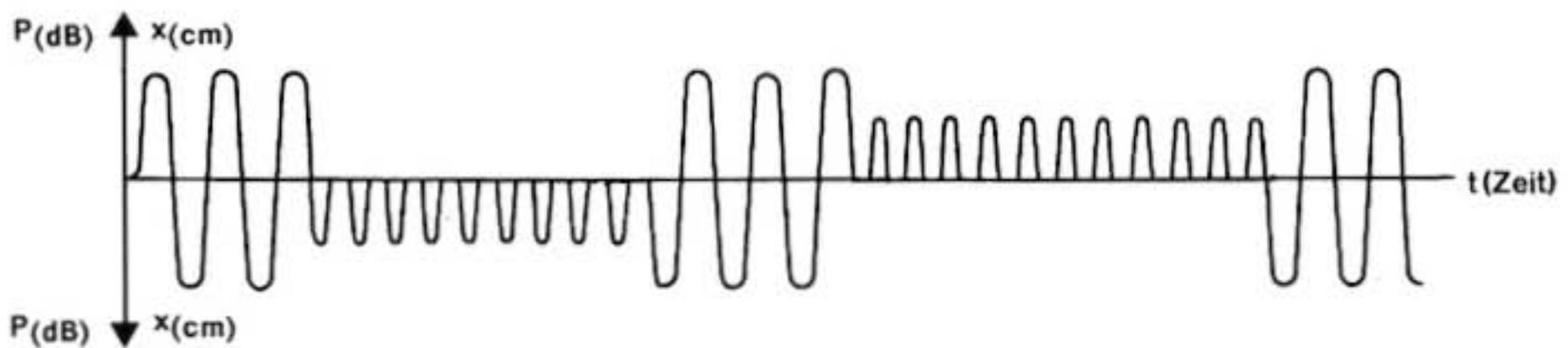
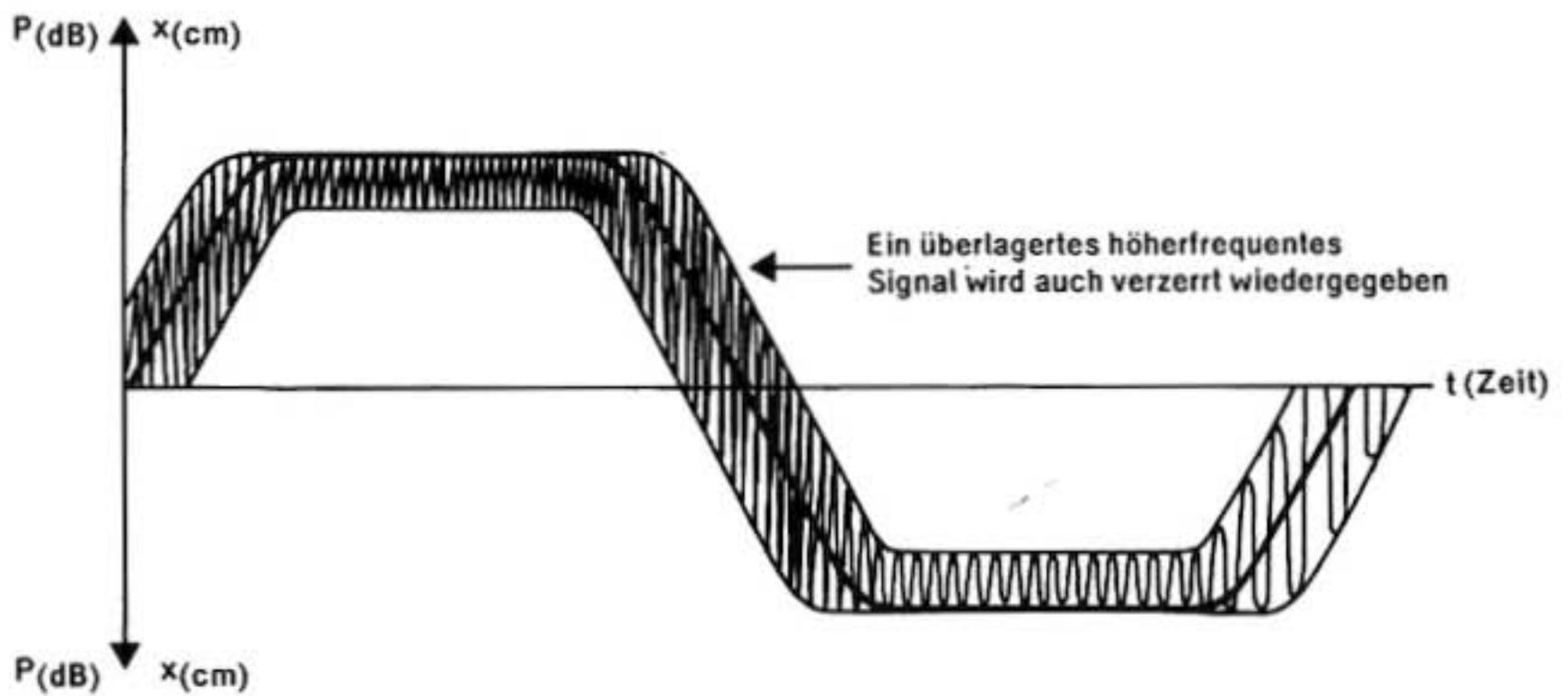
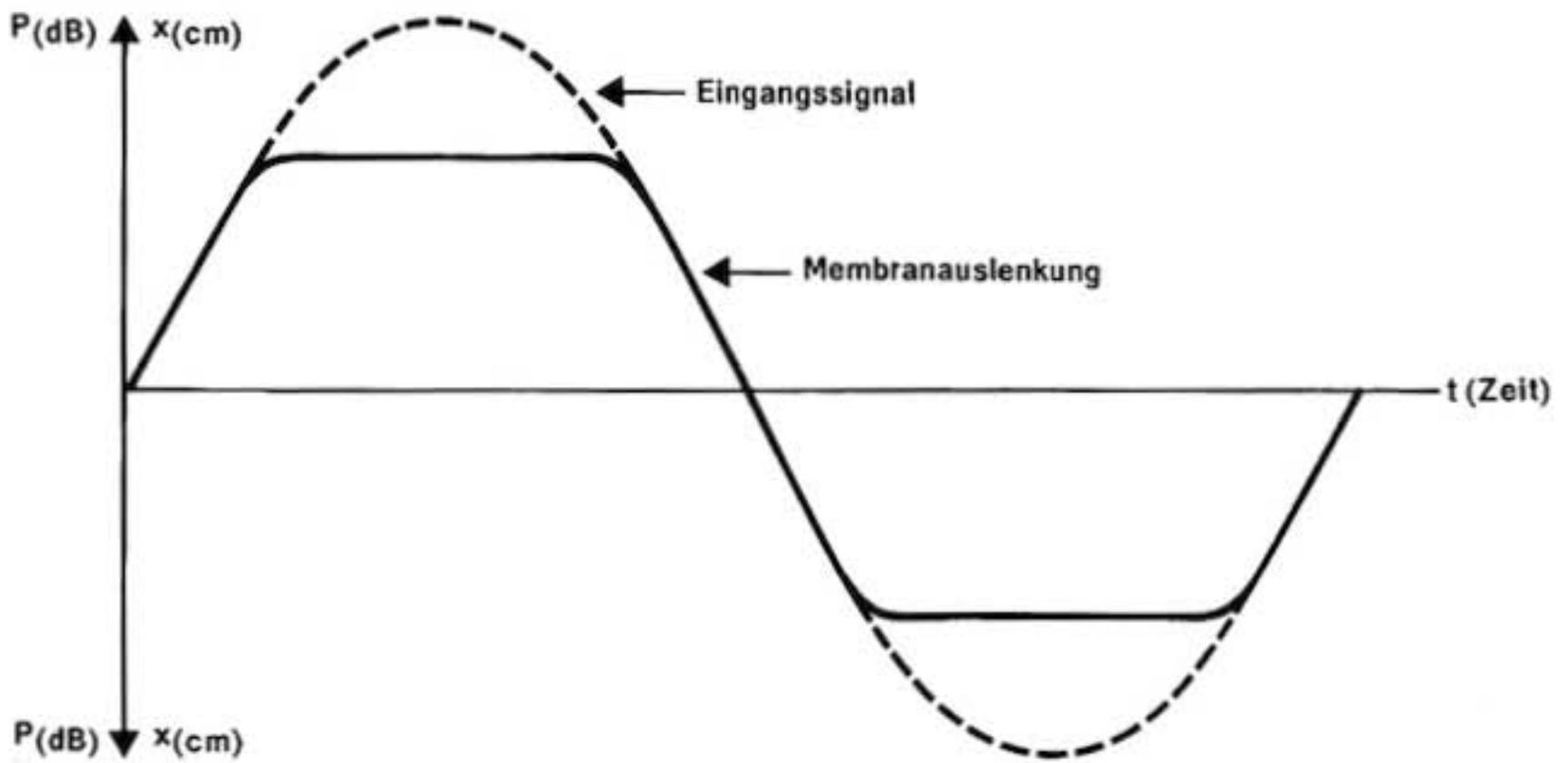
$$= 0,131 \text{ m}$$

Das sind 13,1 cm Membranweg in beiden Richtungen. Daran hat das Chassis sicherlich keine große Freude.

Hierbei sollte immer beachtet werden, wie der Schalldruck und die abstrahlende Frequenz

die Rechnung beeinflussen. Für einen subjektiv doppelten Schalldruck benötigt man die 10-fache akustische Leistung. Nach der Formel für V_d ergibt das die dreifache Membranauslenkung. Wenn Sie tiefe Frequenzen reproduzieren wollen, so gibt das durch die quadratische Frequenz auch eine quadratische Zunahme der nötigen Membranauslenkung. Bei der halben Frequenz ist die vierfache Auslenkung für gleichen Schalldruck erforderlich. Ist jetzt klar, warum kleine Membranen so ungern sehr tiefe Frequenzen reproduzieren? Für 1 akustisches Watt bei 30 Hz müsste eine 13 cm Membran etwa 20 cm Auslenkung in beide Richtungen ausführen, was verständlicherweise nicht geht. Aber selbst bei deutlich geringeren Leistungen verhindert die Wurzel über P_{ak} eine entsprechende Reduktion der Membranauslenkung. Ergebnis: Selbst bei der geringeren Leistung von 0,1 Watt akustisch (das sind 10 elektrische Watt Eingangsleistung bei 1 % Wirkungsgrad) bewegt sich die Membran von einem mechanischen Anschlag zum anderen:

3



86902-2.3.

$$V_d = 1,5 \cdot \frac{\sqrt{0,1}}{30^2}$$

$$= 0,000527 \text{ m}^3$$

Die zu bewegende Luftmasse ist dann 0,527 Liter. Die Membranauslenkung ist dann:

$$X_d = \frac{0,000527 \text{ m}^3}{0,009 \text{ m}^2}$$

$$= 0,0586 \text{ m} = 5,86 \text{ cm}$$

Verzerrungen

Die Verzerrungen erreichen bereits weit vorher 100 %, nämlich bei ca. 2 Watt Eingangsleistung. Das ist auch der Grund dafür, warum besonders 2-Wege Boxen bereits bei sehr geringen Eingangsleistungen deutlich hörbare Verzerrungen im Mitteltonbereich produzieren können. Der Tieftöner überträgt hier auch einen großen Teil des Mitteltonbereiches mit. Durch die nichtlineare Membranbewegung im Bereich des mechanischen Anschlags der Membranaufhängung werden natürlich alle vom Chassis abgestrahlten Frequenzen verzerrt wiedergegeben (Bild 2.3).

Welchen Einfluß haben jetzt verschiedene Abhörbedingungen auf die Berechnungen? Sie fragen sich jetzt sicherlich, warum einer Lautsprecherbox zu Hause gegenüber der Vorführung im Hifi-Studio eventuell viel mehr Leistung zugeführt werden muß. Die Abhör-lautstärke war doch genau richtig.

Nehmen wir an, der Wohnraum ist größer als das Studio. Da Sie immer im indirekten Schallfeld sitzen, in dem die Schallenergie gleichmäßig verteilt ist, benötigen Sie für die gleiche Lautstärke mehr akustische Leistung. Der Leistungsbedarf steigt mit dem Raumvolumen linear an: doppeltes Volumen gleich doppelte Leistung; 10-faches Volumen gleich 10-fache Leistung. Jetzt zur subjektiven Lautstärke. Hifi-Studios sind meist sehr gut schallisoliert, der Störgeräuschpegel ist geringer als in einem Wohnraum. Da jeder Hörer die Lautstärke

Bild 2.3. Bei nichtlinearer Bewegung einer Lautsprechermembran werden auch alle gleichzeitig abgestrahlten höheren Frequenzen verzerrt wiedergegeben.

unbewußt immer nach dem Störgeräuschpegel einstellt, damit die leisen Passagen noch hörbar bleiben, gilt hier wieder der subjektive Faktor: doppelte Lautstärke gleich zehnfache Leistung. Aber diesmal umgekehrt. Das heißt: Ist der Geräuschpegel im Studio um die Hälfte geringer als im Wohnraum, genügt ein Zehntel der Leistung. Doppelte Lautstärke gleich zehnfache Leistung gilt auch für den Baßregler eines Verstärkers. Auch hiermit wird die Leistung um den Faktor 10 multipliziert, wenn Sie die Lautstärke im Baß verdoppeln wollen, was gerade bei kleinen Boxen in großen Räumen oft nötig erscheint.

In den Überlegungen liegt der Belastungsunterschied für subjektiv gleichen Schalldruck bei möglichen 30 dB, das entspricht dem Verhältnis von 1 : 1000. Das ist natürlich die obere Grenze dessen, womit man rechnen muß. Verhältnisse von 1 : 10 oder 1 : 100 sind jedoch an der Tagesordnung. Setzt man jetzt den Wert

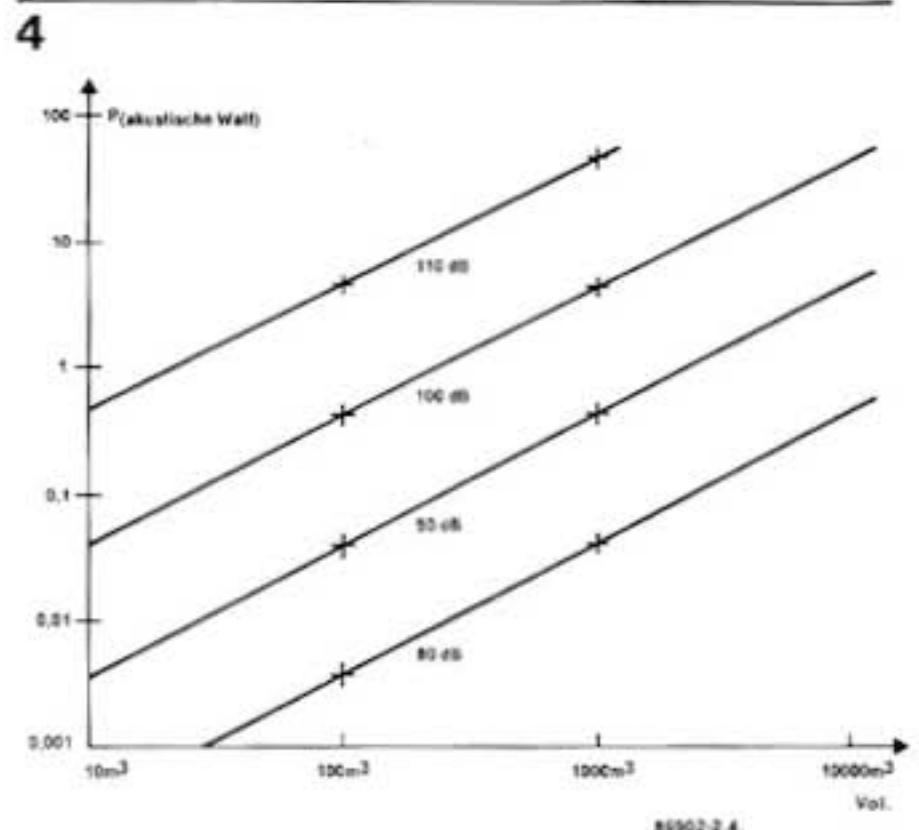


Bild 2.4. Die Grafik zeigt die benötigte akustische Leistung für einen gewünschten Schallpegel in verschiedenen Räumen. Die benötigte elektrische Leistung (Belastung der LS-Boxen) berechnet sich aus dem Wirkungsgrad der Boxen. Er beträgt für Hifi-Boxen 0,2 % bis 1 %. Das sind etwa 86 bis 93 dB für 1 Watt in 1 m Abstand. Demnach sind die elektrischen Werte um Faktor 100 bis 500 größer. Die Reproduktion kurzer und lauter Impulse wird dadurch für kleinere LS-Boxen oft zu einer gefährlichen Belastungsprobe.

der Luftmenge V_d mit der akustischen Leistung ins Verhältnis, dann gibt der Quotient zusammen mit der Grafik aus Bild 2.4 Auskunft über die Leistungsgrenze kleiner Lautsprecherboxen. Man erkennt deutlich, daß Boxen mit 13...20 cm Tieftonmembranen unabhängig von der elektrischen Belastbarkeit an der Grenze der mechanischen Überlastung dimensioniert sind. Das ist nicht gut, denn die normalerweise vorhandene Verstärkerleistung reicht immer aus, um diese Grenze bei tiefen Frequenzen zu überschreiten. Das ist immer zu beachten, wenn man die Belastbarkeitsangaben der Hersteller richtig interpretieren will. Kratzer auf Schallplatten oder Fehler in der Elektronik, die kurzfristig die volle Verstärkerleistung mobilisieren, können hier teure Reparaturkosten verursachen.

Größere Chassis mit 30 cm oder 38 cm Membranen bieten bessere Sicherheitsreserven. Um das zu verdeutlichen, vergleichen wir ein 13 cm Chassis und ein 38 cm Chassis unter dem Aspekt der Leistungsfähigkeit. Das 13 cm Chassis verfügt über 88 qcm Membranfläche, das 38er-Chassis über 880 qcm. Aus der Luftmengengleichung errechnet sich durch die Wurzel über P_{ak} bei 10-facher Membranfläche die 100-fache Schalleistung für gleiche Membranauslenkung:

$$V_d \cdot f^2 \approx 1,5 \cdot \sqrt{P_{ak}}$$

Die 10 cm Schwingspule eines guten 38 cm Chassis kann eine Dauerleistung von 200...600 Watt vertragen, während die 2,5 cm Spule eines üblichen 13er-Chassis bereits bei 50 Watt Dauerleistung Rauchzeichen abgibt. Das bedeutet für die Sicherheitsreserven einen durchschnittlichen Unterschied von 1 : 2000. Sie sehen, weshalb gerade bei kleinen Boxen höchstes Lob und Verriß mehr eine Folge der Arbeitsbedingungen der Box, als ein Maßstab für die Qualifikation des Testteams ist. Da nun diese kleinen Boxen so gerne gekauft werden, kann hier nur eine Warnung stehen:

Auch wenn ein Testbericht noch so gut ist, testen Sie die Boxen immer im eigenen Wohnraum am eigenen Verstärker! Bei größeren Boxen mit 30 cm oder 38 cm Tieftonchassis ist es sicherer, ein Testergebnis zu bewerten. Große Räume, höhere Schallpegel und aufgedrehte Baßregler vertragen diese Boxen wesentlich besser. Vergessen Sie aber bitte unter klanglichen Aspekten nicht das Kapitel über Raum-

akustik, sowie die möglichen Verständigungsschwierigkeiten zwischen diesen Boxen und Ihrem Verstärker.

Wenn Sie jetzt vor dem Dilemma stehen, daß Sie bereits kleine Boxen besitzen bzw. keine großen aufstellen können, während Raumgröße oder Abhörlautstärke aber dringend leistungsfähigere Boxen nahelegen, dann ist evtl. ein Subwoofer angebracht. Sollen die kleinen Boxen nur Frequenzen beispielsweise oberhalb 120 Hz abstrahlen, dann genügen geringere Membranauslenkungen und Membranflächen für hohen Schalldruck (dafür ist die quadratische Frequenz in der V_d -Berechnung verantwortlich). Plötzlich leistet auch ein sehr kleines Chassis erstaunlich viel; davon aber später mehr.

Lautsprecherchassis

Soweit einige Betrachtungen zur Leistungsfähigkeit bzw. Belastbarkeit von Lautsprecherboxen und Chassis. Die bisherigen Betrachtungen gelten prinzipiell für fast alle Lautsprecherboxen, mit Ausnahme der Hornlautsprecher. Geringere Unterschiede sind bei Baßreflexboxen zu beachten, aber darauf kommen wir noch genauer zu sprechen.

Vorerst beschäftigen wir uns mit den einzelnen Bestandteilen von Lautsprecherboxen, den Gehäusekonstruktionen und den Unterschieden zwischen guten und weniger guten Lautsprechern. Hierbei finden sich die seltsamsten Abhängigkeiten zwischen Gehäusebauform und notwendigem Chassis, Herstellungskosten sowie Leistung und Belastbarkeit. Außerdem untersuchen wir einige Werbeaussagen verschiedener Händler und Hersteller, die immer wieder Neuerungen als Verbesserungen und belanglose Details als extrem wichtig herausstellen. Hierzu direkt ein Beispiel:

Drei Lautsprecherboxen haben gleiches Volumen, die gleiche untere Grenzfrequenz (−3 dB Punkt) und den gleichen maximalen Schallpegel. Sie sind allerdings nach verschiedenen Prinzipien aufgebaut: einmal als geschlossene Box, einmal als sogenannte Baßreflexbox und einmal als aktiv entzerrte Baßreflexbox. Hätten Sie nun vermutet, daß die aktiv entzerrte Baßreflexbox gegenüber der geschlossenen Box nur 20 % des teureren Magnetmaterials benötigt? Außerdem genügt ein kleineres Tieftonchassis, das die Wiedergabe des Mitteltonbereiches gleich mit überneh-

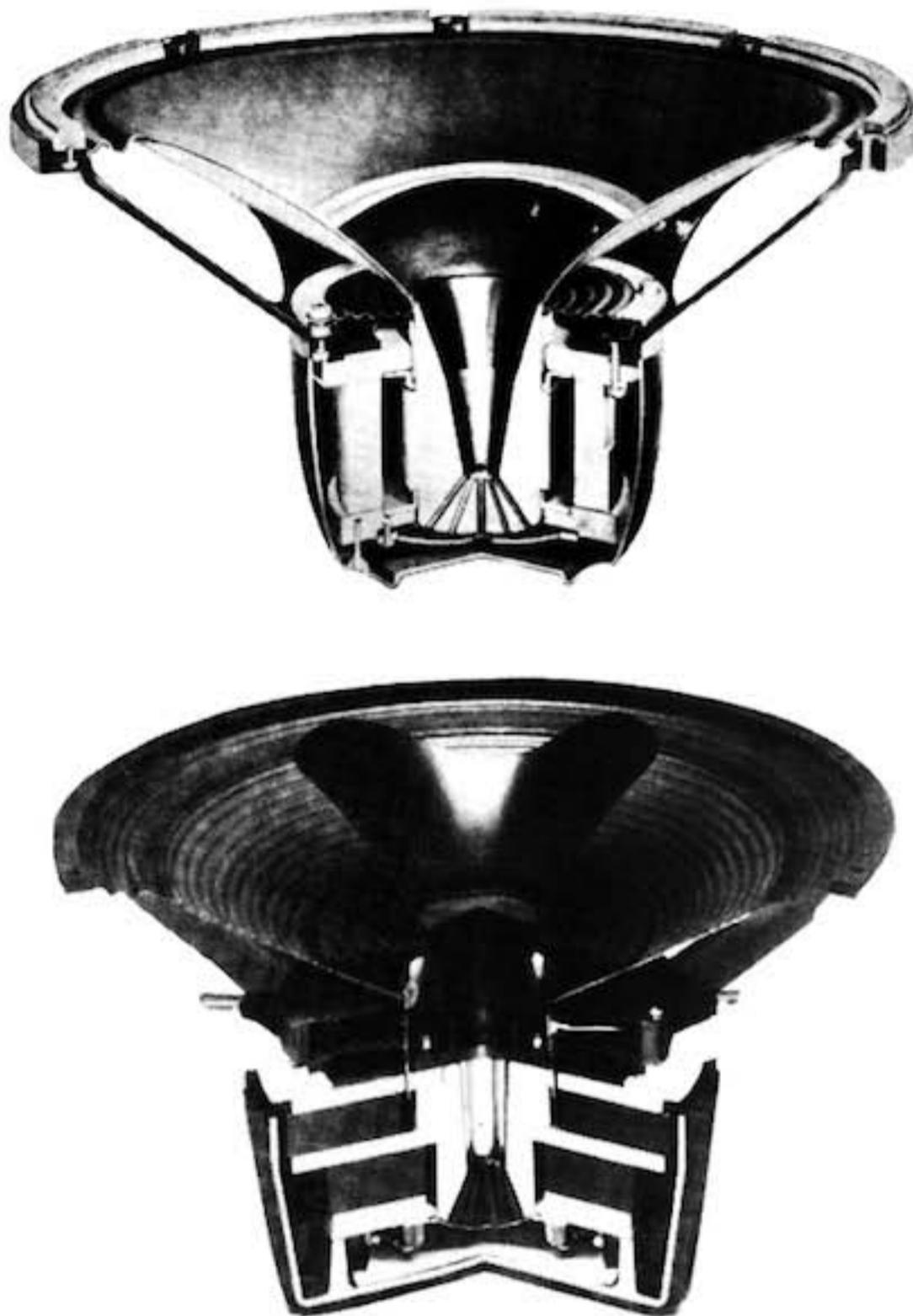


Bild 2.5. Hochwertige Lautsprecherchassis im Schnitt, die Koaxialchassis der Firmen Gauss und Tannoy.

men kann. So läßt sich dann auch noch das Mitteltonchassis einsparen. Das senkt die Herstellungskosten gewaltig, weniger den Verkaufspreis. Wenn Sie jetzt ernsthafte Zweifel haben, ob die Boxen wirklich so gleich sind wie es anfangs aussah, dann sind sie berechtigt. Das ist genau der springende Punkt mancher Werbeaussagen in den Hochglanzpros-

pekten. Werbefachleute haben eine ausgesprochene Vorliebe dafür, Kriterien herauszustellen, die für eine Bewertung des Produkts völlig ungeeignet sind! Dazu gehören Schlagworte wie:

Untere Grenzfrequenz, Wirkungsgrad, Belastbarkeit, max. Schallpegel, Verzerrungen (da bei Messungen nicht alle Verzerrungen erfaßt werden), Anstiegszeit, bewegte Masse und Magnetgröße (magnetischer Gesamtfluß wäre richtiger) der Chassis. Weiter gibt es noch Begriffe wie Linear-Phase, Phase-aligned,

Gegenkopplung, masselose Wandler. Aber auch abenteuerliche Gehäusekonstruktionen sollen oft nur von den Schwächen der Produkte ablenken.

Es gibt heute eine Unzahl verschiedenster Lautsprecherchassis für die verschiedensten Einsatzzwecke. Natürlich gibt es auch einige exotische Konstruktionen, aber der weitaus größte Teil arbeitet nach dem Prinzip des dynamischen Tauchspulenwandlers. Bei dieser Lautsprecherfamilie ist eine ringförmige Schwingspule beweglich im Luftspalt eines Permanentmagneten angebracht (Bild 2.6). Wenn ein Strom durch diese Spule fließt, so erzeugt dieser eine Kraft, die senkrecht zur Spule und dem Magnetfeld wirkt; diese Kraft versetzt die Spule in Bewegung. Eine mit der Spule verbundene Membran bewegt sich dann ebenfalls. Solche oder ähnliche Beschreibungen findet man häufig zum Thema dynamische Membranlautsprecher.

Sicher ist dieses Umwandlungsprinzip von elektrischer in akustische Energie nicht das Optimum, das man sich zu diesem Thema vorstellen kann. Es sind auch andere und weit bessere Lösungen denkbar. Doch erlaubt das Tauchspulenwandlerprinzip eine Großserienfertigung zu minimalen Kosten. Außerdem können recht kleine Membranen große Luftmengen bewegen. Über die Ähnlichkeit von den elektrischen Signalen und den erzeugten Schallwellen besagt das aber noch nichts!

Für Hersteller und Käufer bedeutet das aber immerhin, daß die Wiedergabe tieferer Frequenzen auch mit vergleichsweise kleinen Chassis in entsprechend kleinen Gehäusen möglich ist. (Leider sagt das jetzt wieder nichts über den maximalen Schallpegel bei tiefen Frequenzen aus.)

Kaum ein Hifi-Fan kommt daher um dieses Wandlerprinzip (zumindest im Baßbereich) herum. Es ist aus diesem Grunde wichtig zu wissen, was die guten Exemplare von den weniger guten unterscheidet. Aber auch, warum sehr gute Chassis oft einzeln erheblich teurer sind, als anderswo komplette Lautsprecherboxen.

Die Lautsprecher-Schnittzeichnung in Bild 2.7 zeigt alle wichtigen Bestandteile eines Chassis.

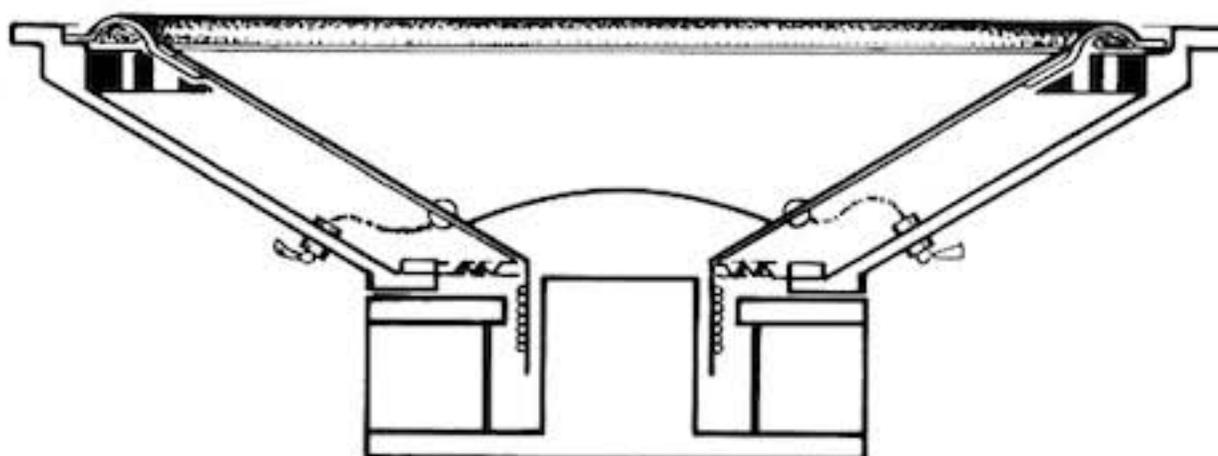
Die Schwingspule bewegt die Membran, die durch Sicke und Zentrierspinne beweglich eingespannt ist. (Bei guten Chassis ist hier die Bewegung nur entlang einer Achse möglich, während die Membran bei schlechteren Chassis erheblich mehr Freiheitsgrade hat.)

Es gibt auch Chassis mit zwei Zentrierspinnen, was bei hoher Beanspruchung erheblich mehr Betriebssicherheit bietet (Musikerchassis und PA-Betrieb), aber bei Hifi-Chassis seltener zu finden ist (leider). Außerdem gibt es Chassis mit zwei Zentrierspinnen ohne Sicke. Diese laufen unter der Bezeichnung Edgeless-Cone. Vorteile dieser Konstruktion sind weniger Ärger durch unkontrollierte Bewegungen der Sicke (Verzerrungen). Dafür aber gibt es mehr Ärger mit Membranresonanzen, da das dämpfende Element der Sicke fehlt.

Die Kombination von Schwingspule und Magnet ist der Antrieb eines jeden Chassis. Hier wird (u.a.) die Kraft erzeugt, die Spule und Membran bewegt. Der Antrieb läßt sich bei jedem dieser Chassis durch einen Kraftfaktor beschreiben, der auch als Wandlerkonstante

Bild 2.6. Prinzipieller Aufbau eines Tauchspulenlautsprechers.

6



bekannt ist. Wieso der Begriff Konstante hier oft nicht zutrifft, wird sich gleich noch zeigen. Dieser Kraftfaktor wird als BI-Produkt angegeben, da er, erfreulich einfach, das Produkt aus magnetischer Flußdichte im Luftspalt B und effektiver Leiterlänge des Spulendrahtes l in diesem Luftspalt ist.

Beispiel: Flußdichte B = 1,6 Tesla, Drahtlänge l im Luftspalt = 15 m; daraus ergibt sich ein BI-Wert von 24 Tm.

Da sich die verschiedenen Einheitensysteme inzwischen angenähert haben, können wir Tm (Tesla x Meter) durch N/A (Newton pro Ampere) ersetzen. Für unser Chassis mit BI = 24 N/A ergibt sich für 100 Watt an 8 Ohm:

$$U = \sqrt{P \cdot R} = 28,3 \text{ V und}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = 3,5 \text{ A}$$

Stellt man die Formel

$$BI = \frac{N}{A}$$

nach N um, kann man die Kraft berechnen:

$$\begin{aligned} N &= BI \cdot A \\ &= 24 \cdot 3,5 = 84,9 \text{ Newton.} \end{aligned}$$

Bei einem Strom von 3,5 Ampere erzeugt der Antrieb eine Kraft von 85 N, das ist genug, um ein 8 kg schweres Chassis zu bewegen. (Bitte nicht ausprobieren, 100 W Leistung bei reinem Gleichstrom vertragen auch die stabilsten Chassis nicht sehr lange. Da bei Messungen mit Gleichstrom die Kühlung durch Luftbewegung im Luftspalt ausfällt, können die Schwingspulen einiger Chassis bereits bei sehr viel geringeren Leistungen zerstört werden. Arbeiten Sie bei Messungen von BI immer mit Stromstärken deutlich unter 1 Ampere, sonst nützen die Meßergebnisse u.U. nicht mehr viel.)

Der Begriff Wandlerkonstante kommt daher, daß sich mit diesem Wert alle mechanischen Daten des Chassis in elektrische Daten eines Ersatzschaltbildes umrechnen lassen. Die Arbeit mit derartigen Ersatzschaltbildern vereinfacht die Konstruktion von Lautsprecherboxen erheblich, außerdem ist die Berechnung von Frequenzweichen ohne Ersatzschaltbild alles andere als sinnvoll.

Neben den bereits genannten Teilen gehören zum Chassis noch die Membran und der Korb, der die mechanische Verbindung zwischen allen Teilen herstellen soll (was ihm nicht in allen Fällen so richtig gelingt); Membran und Schwingspule machen den größten Teil der bewegten Masse aus. Da aber die Membranaufhängung ebenfalls nicht masselos ist, gibt

7

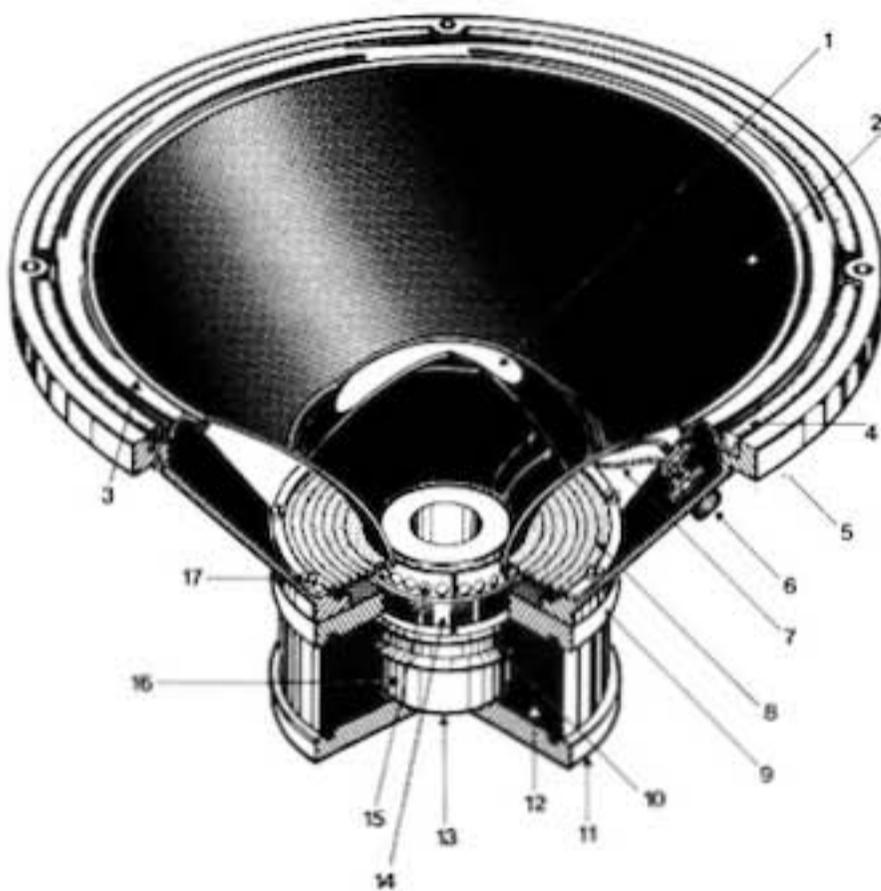
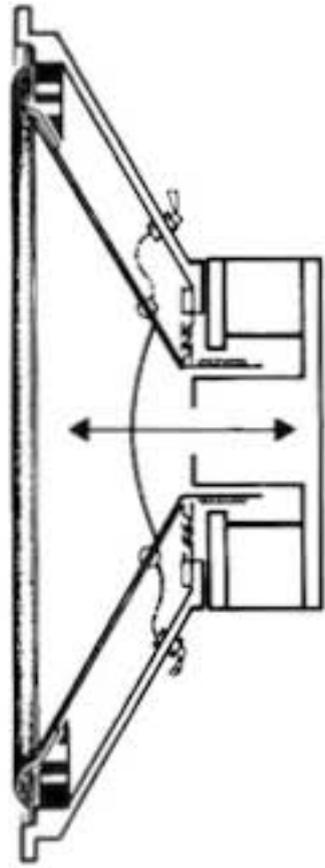


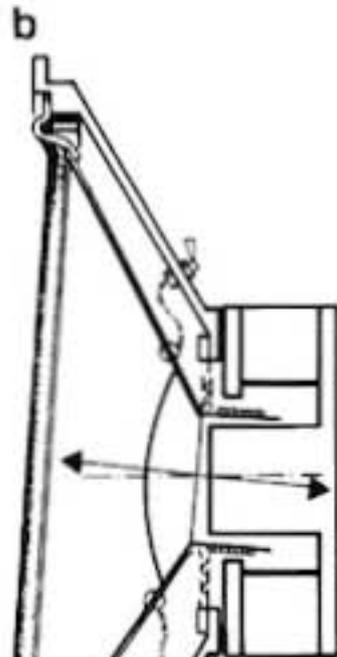
Bild 2.7. Bestandteile eines Lautsprechers:

1. Staubschutzkappe
2. Membran
3. äußere Zentrierung (Sicke)
4. Dichtungsring
5. Chassiskorb
6. Anschlußklemmen
7. Zuleitungskabel zur Schwingspule
8. innere Zentrierung
9. Polplatte
10. Kurzschlußring
11. hintere Polplatte
12. Magnet
13. Ventilationsöffnung
14. Schwingspule
15. Schwingspulenträger
16. Polkern
17. Befestigungsschrauben

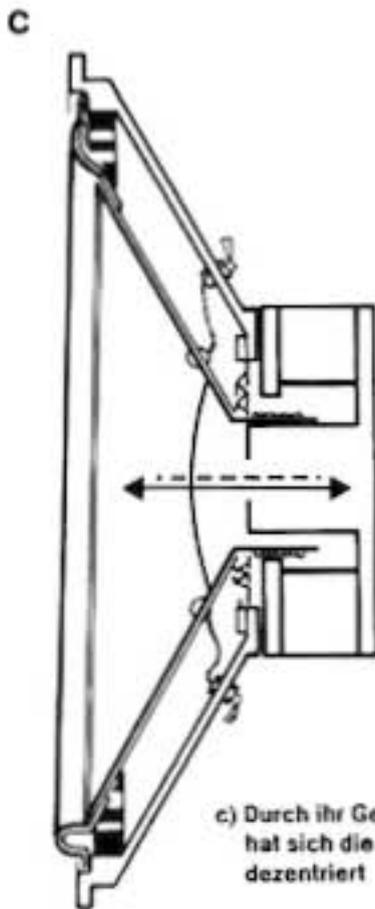
8a



a) Die gewünschte Bewegung



b) Eine unerwünschte Bewegung



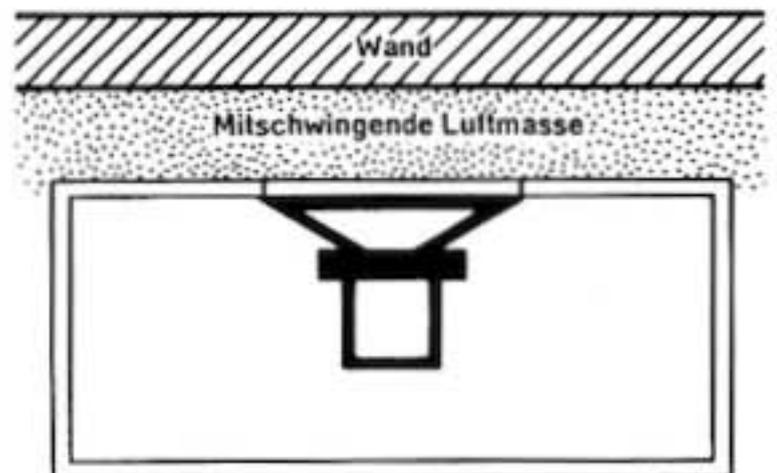
c) Durch ihr Gewicht hat sich die Membran dezentriert

Bild 2.8a...Bild 2.8c. Bei preiswerteren Chassis kommt es oft vor, daß die Schwingspule verkantet (b) oder dezentriert (c) wird. Wenn gleichzeitig der Luftspalt sehr eng ist (hohe Flußdichte mit wenig Magnet), kommt es zu Kratzgeräuschen oder was noch schlimmer ist, zu klemmenden Spulen.

es hier immer etwas Ärger mit der genauen Bestimmung der bewegten Masse. Daneben bewegt die Membran bei tiefen Frequenzen immer eine kleine Luftmasse M_{all} mit, bis ca. 10 g bei sehr großen Membranen. Das dazu führt, daß man eine andere Resonanzfrequenz mißt, als man sie mit der bewegten Membranzmasse des Chassis errechnet hat. Diese mit-schwingende Luftmasse (engl. Air Load) ist natürlich auch von der Aufstellung einer Lautsprecherbox abhängig. Bei einer Aufstellung wie in Bild 2.8d gezeichnet, kann sich die mit-schwingende Luftmasse erheblich vergrößern; das ist nach der Aufstellung in Bild 2.8e nicht möglich.

Die Resonanzfrequenz: Die Membran (Masse) bildet zusammen mit der Aufhängung (Feder) einen mechanischen Schwingkreis. Er hat (wie ein elektrischer L-C Kreis) eine Resonanzfrequenz, bei der das schwingende System mit der größten Auslenkung auf eine Anregung von außen reagiert. Gleichzeitig ist die Reso-

8d



e

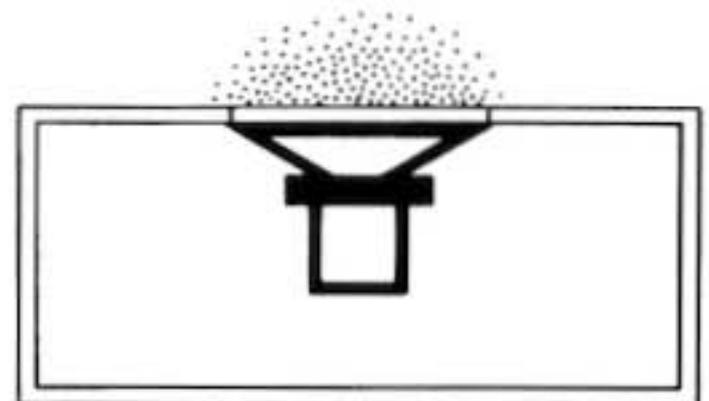
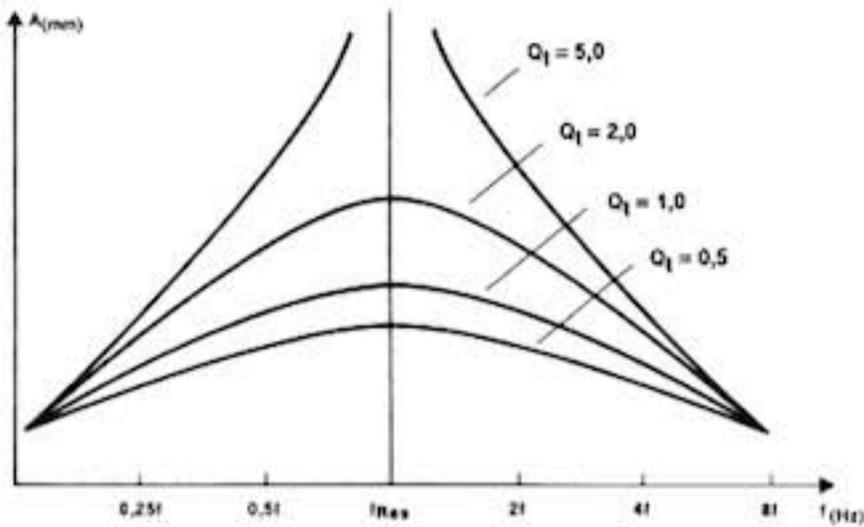


Bild 2.8d und Bild 2.8e. Stellt man eine Lautsprecherbox wie in Zeichnung d skizziert auf, vergrößert sich die mitschwingende Luftmasse erheblich. Dadurch verringert sich die Resonanzfrequenz des Chassis unter die berechneten Werte.

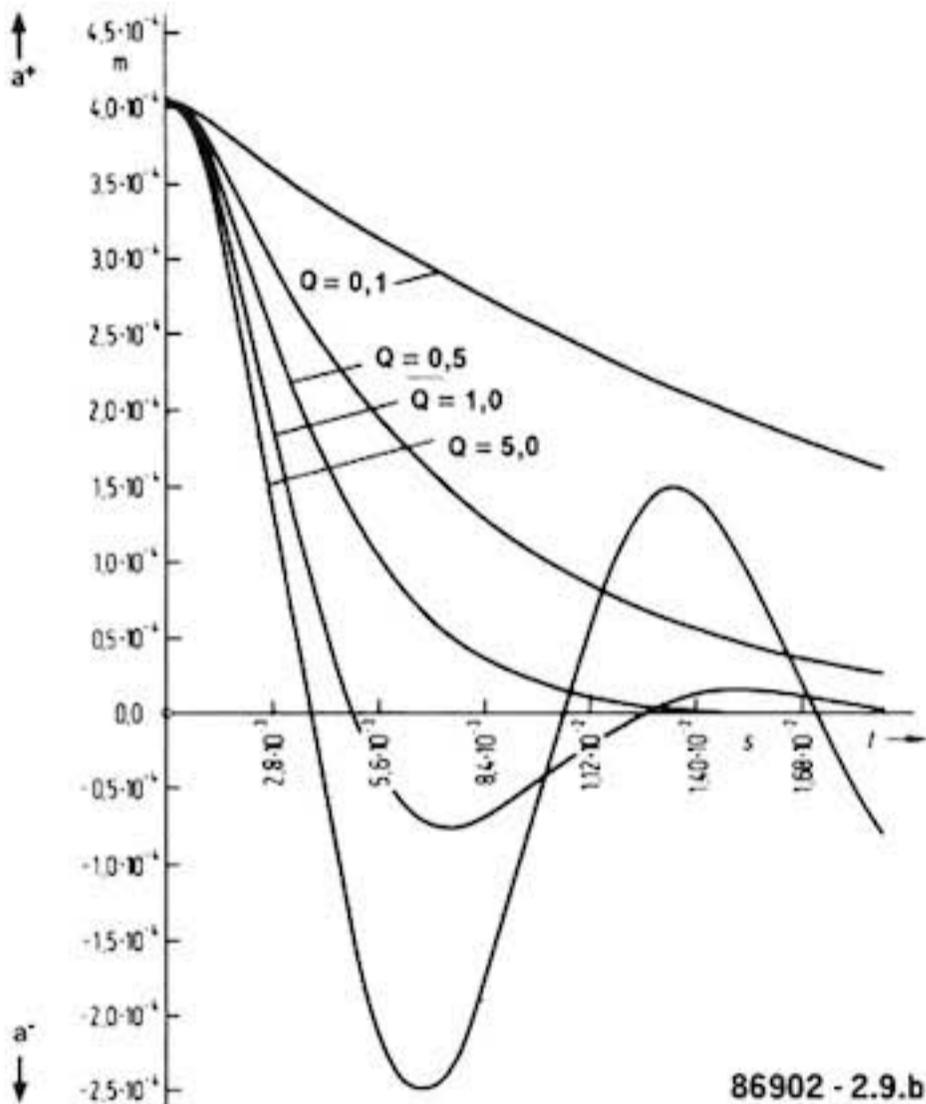
nanzfrequenz die Frequenz, mit der das schwingende System ausschwingt, wenn keine Kraft von außen mehr zugeführt wird. (Lautsprecherfreaks sollten hier berücksichti-

9a

rel. Membranauslenkung



b



86902 - 2.9.b

Bild 2.9. Die Kurven in 2.9a zeigen die Membranauslenkung des mechanischen Schwingkreises in Abhängigkeit von der (Schwingkreis-)Güte Q . Die Kurvenschar in 2.9b gibt das Ausschwingverhalten des Schwingkreises für verschiedene Güten an.

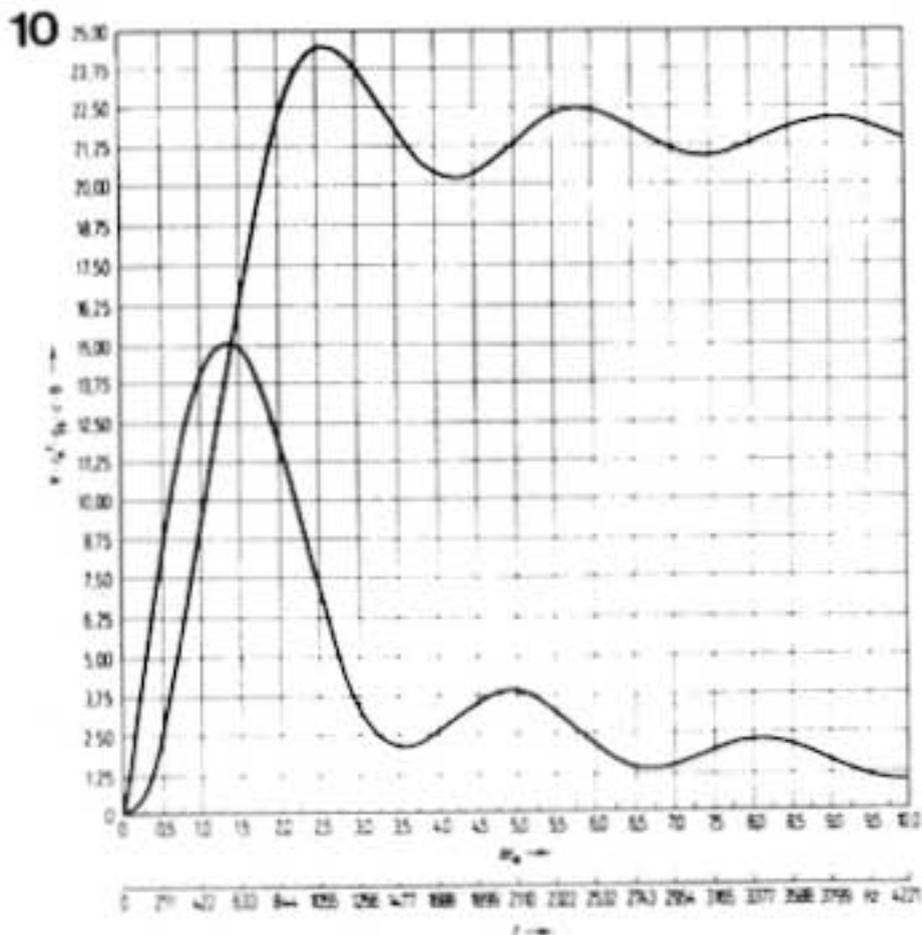
gen, daß es um das Ausschwingen ohne Signal geht, nicht um das Reaktionsvermögen des Chassis, wenn ein anderes Signal vom Verstärker geliefert wird.)

Zur Resonanzfrequenz gehört, wie bei jedem Schwingkreis, die Güte Q . Diese beschreibt die relative Auslenkung und das Ausschwingverhalten des Schwingkreises Lautsprecherchassis. In Analogie zu elektrischen Schwingkreisen berechnet sich die Güte auch hier aus dem Verhältnis von Blindwiderständen (Massenträgheit, Federsteife) zu Wirkwiderständen (Reibung, Strahlungswiderstand). Die Kurven in Bild 2.9 zeigen den Zusammenhang zwischen Auslenkung und Ausschwingverhalten für verschiedene Gütewerte Q (0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0).

Lassen die Kurven Zweifel wach werden? Das Chassis soll doch einen linearen Schalldruckverlauf aufweisen. Doch bereits bei der Güte 0,5 ist die Auslenkung der Membran bei der Resonanzfrequenz größer als bei anderen Frequenzen. Um hier weiterzukommen, müssen wir einen besonderen Widerstand etwas genauer betrachten, den Strahlungswiderstand R_{str} der Luft. An ihm wird letztendlich die gewünschte Schallenergie erzeugt. In Lehrbüchern wird der Strahlungswiderstand der Luft mit 420 mechanischen Ohm/m² angegeben. Für eine Membran mit 30 cm Durchmesser (ca. 500 cm²) errechnen sich hier immerhin 21 Ohm. Das ist recht viel, verglichen mit den elektrischen 8 Ohm der Schwingspule. Leider gilt der Wert nur oberhalb der Anpassungsfrequenz, wenn die Schallwellen gegenüber dem Membrandurchmesser klein sind. Für tiefe Frequenzen sinkt der Wert im Quadrat zur Frequenz, so daß bei 20 Hz von den 21 Ohm gerade noch 0,01 Ohm übrigbleiben. Das ist nun nicht mehr so überwältigend. Die Verhältnisse für eine 2 cm Membran sehen Sie in Bild 2.10.

Um den fallenden Strahlungswiderstand zu kompensieren, muß die Membranauslenkung zu tieferen Frequenzen für konstanten Schalldruck im Quadrat zunehmen. (Jetzt wissen Sie auch, woher das Quadrat bei der Frequenz in der Gleichung für V_d kommt.) Außerdem ist auch klar, warum es außerordentlich gefährlich ist (im Sinne von teuer), kleine Lautsprecherchassis zur Wiedergabe tiefer Frequenzen zu zwingen.

Welche Gütewerte sind jetzt nötig, um die gewünschte Zunahme der Membranauslenkung



zu erreichen? Das Diagramm in Bild 2.11 zeigt den Schalldruckverlauf für verschiedene Güten.

Diese Werte gelten für Chassis, die in eine Meßschallwand eingebaut sind und die Schallenergie halbkugelförmig abstrahlen! Machen Sie bitte nicht den Fehler, das direkt auf Ihre Boxen zu übertragen. Mangels großer Schallwand ist die Abstrahlung hier nicht immer halbkugelförmig (Bild 2.12a), sondern bei verschiedenen Frequenzen auch kugelförmig (Bild 2.12b). Das heißt: doppelte Oberfläche bei der Abstrahlung und damit weniger Schalldruck bei diesen Frequenzen.

Einige Worte zum Thema Schalldruck, Schallpegel, sowie Leistung und Leistungspegel, da es hier erfahrungsgemäß immer zu großen Mißverständnissen kommt.

Gegenüber den absoluten Größen wie Leistung in Watt oder Schalldruck in N/m^2 , bezeichnet der Begriff Pegel immer das Verhältnis einer Größe zu einem willkürlich gewählten Bezugspunkt. Um das Arbeiten mit diesen Verhältniszahlen zu vereinfachen, wird gerne mit den logarithmischen Werten dieser Zahlen gerechnet, Sie erkennen das an der Bezeichnung dB (dezibel). Der klare Vorteil dieser Rechenart liegt darin, daß auch sehr unhandliche Verhältnisse (z.B. $1/254780933,5$) einfacher, und mit meist für unsere Zwecke ausreichender Genauigkeit dargestellt werden können. Hier könnten es $-148,1$ dB Schallpegel sein. Könnten, damit geht es los, denn es könnte z.B. auch ein Leistungspegel von $-74,06$ dB gemeint sein.

Die erste wichtige Spielregel:

$$\text{Schalldruckpegel } p \text{ in dB} = 20 \log \frac{p_1}{p_2}$$

$$\text{Leistungspegel } P \text{ in dB} = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

Der Grund für diese Unterscheidung liegt in der Verkettung von Schalldruck (oder elektrischer Spannung in Netzwerken), Widerstand (elektrische oder mechanische Ohm) und abgegebener Leistung. Es gilt in der Elektrotechnik und in der Akustik für den Zusammenhang:

$$\text{für die elektrische Leistung } P = \frac{U^2}{R}$$

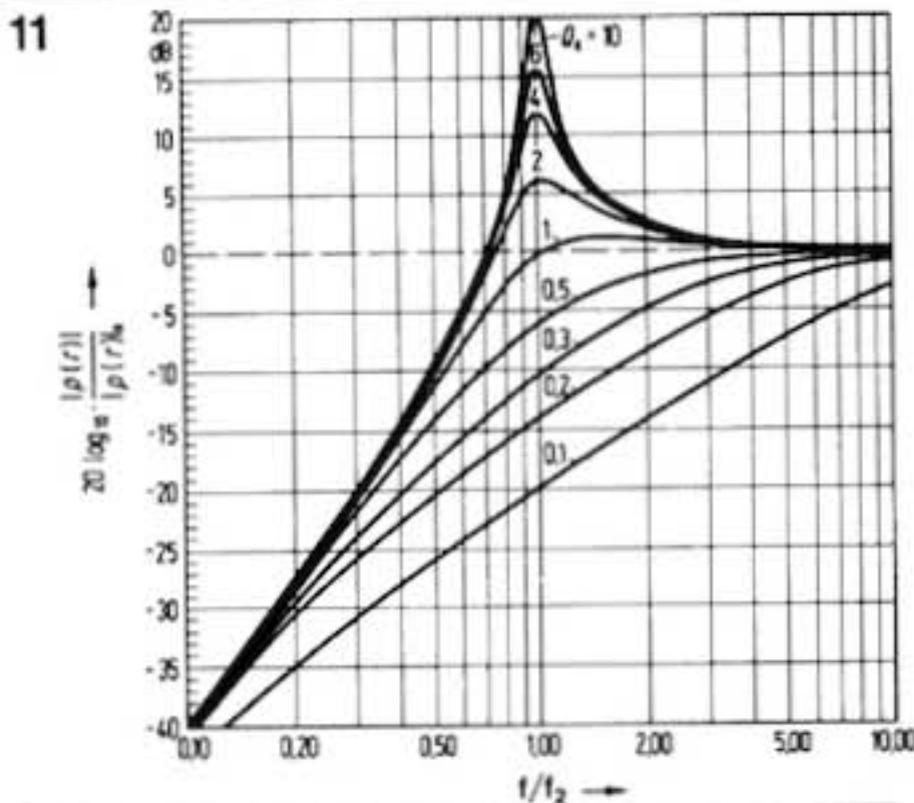


Bild 2.10. Der Strahlungswiderstand für eine 26 cm Membran in Abhängigkeit von der Frequenz (obere Kurve) und der Massenblindwiderstand der Luft (untere Kurve). Die Frequenzskala gilt für eine effektive Membranfläche von 531 Quadratcentimetern (30 cm Baßchassis).

Bild 2.11. Die Schalldruckwiedergabe eines Lautsprecher-Chassis in Abhängigkeit von der Güte Q . Der beste Kompromiß zwischen linearer Schalldruckwiedergabe und Ausschwingverhalten ergibt sich bei $1,0 > Q > 0,5$ (bezogen auf konstant halbkugelförmige Abstrahlung).

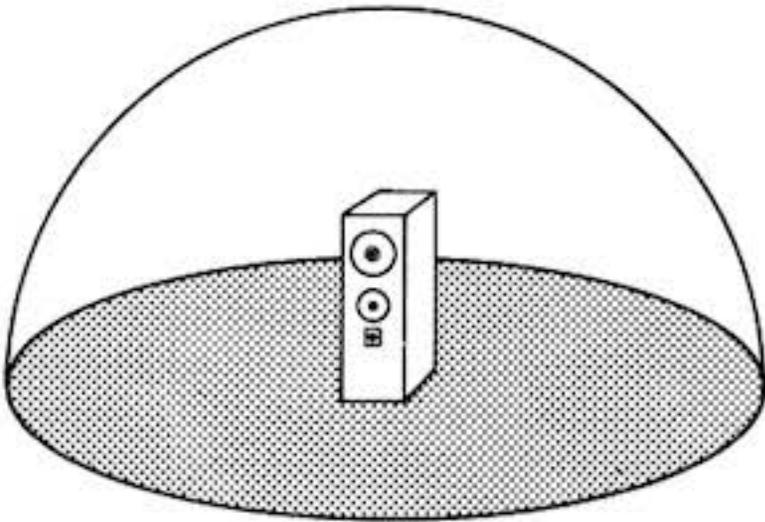
U = Spannung
R = Widerstand

für die akustische Leistung $P = \frac{p^2}{R}$

p = Schalldruck
R = Strahlungswiderstand

Um einem Lautsprecher die doppelte elektri-

12a



b

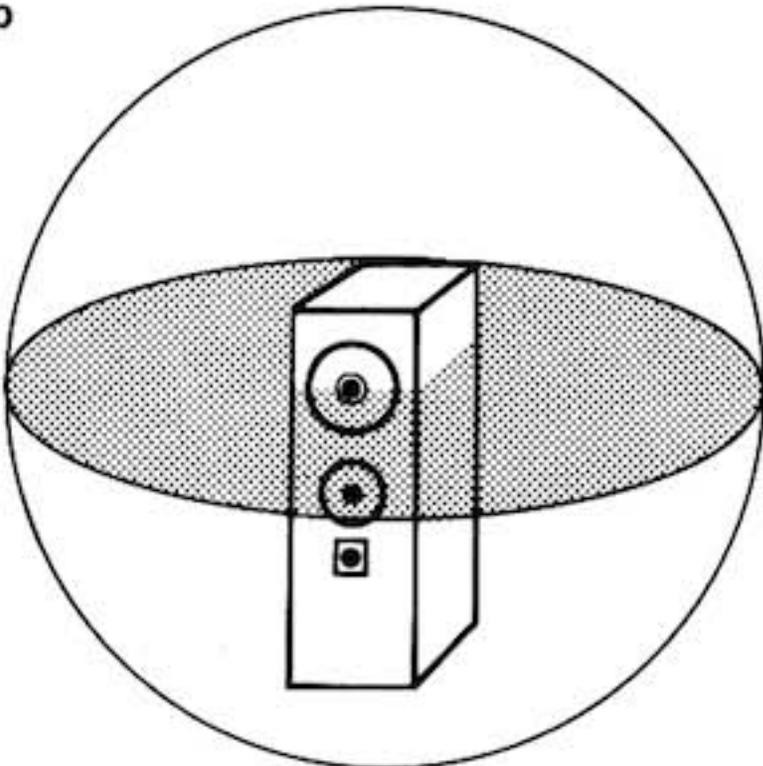


Bild 2.12. Bei tiefen Frequenzen (a) mit großen Wellenlängen erfolgt die Abstrahlung halbkugelförmig, weil der Abstand des Tieftonchassis zum Boden sehr viel geringer ist als die Schallwelle. Für höhere Frequenzen (b) ist dagegen eine kugelförmige Abstrahlung möglich.

sche Leistung zuzuführen, muß die angelegte Spannung um Faktor Wurzel 2 größer werden (der Widerstand des Lautsprechers wird hier als konstant angenommen, in der Praxis ist er temperaturabhängig). Strahlt der Lautsprecher diese doppelte Leistung ab, erzeugt er jetzt einen um den Faktor Wurzel 2 höheren Schalldruck, denn der Strahlungswiderstand der Luft ist für gegebene Membranfläche und für die Frequenz immer konstant (wenn man es ganz genau nimmt, ist auch er etwas temperaturabhängig). Analog dazu erzeugt die doppelte Spannung am Lautsprecher die 4-fache Leistung. Das hat wiederum den doppelten Schalldruck zur Folge.

Mit einem kleinen Taschenrechner oder diesem Buch in der Hand läßt sich der dB-Wert für die doppelte Spannung bzw. für den doppelten Schalldruck relativ leicht ermitteln:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2}{1}$$

$$U_{(p)} = 20 \log \cdot \frac{2}{1} = +6 \text{ dB}$$

Für doppelte Leistung P (elektrisch oder akustisch) finden sie:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2}{1}$$

$$P = 10 \log \cdot \frac{2}{1} = +3 \text{ dB}$$

Die -3 dB Punkte, die sich bei einem Verhältnis von 0,5 ergeben und die oft im Zusammenhang mit Lautsprecherboxen angegeben werden, bezeichnen die Frequenzen, bei denen der Lautsprecher nur noch die halbe akustische Leistung abstrahlt. Betrachten wir die dB-Rechnung einmal unter dem Gesichtspunkt des Exponenten, dem Quadrat über U bzw. p, dann wird deutlich, daß bei der 2-fachen Spannung und der 4-fachen Leistung beide dB-Werte gleich sind:

$$2\text{-fache Spannung} = 20 \log 2 = +6 \text{ dB}$$

$$4\text{-fache Leistung} = 10 \log 4 = +6 \text{ dB}$$

Die 10-fache Spannung erzeugt bereits die 100-fache Leistung:

$$10\text{-fache Spannung} = 20 \log 10 = +20 \text{ dB}$$

$$100\text{-fache Leistung} = 10 \log 100 = +20 \text{ dB}$$

Das Quadrat über U oder p stellt somit im Zusammenhang mit Spannung, Leistung und Schallpegel eine Gefahr für jede Lautsprecherbox dar. Die erzeugte Leistung entspricht also

dem Quadrat der eingegebenen Spannung. Will man den Schalldruck um 10 dB erhöhen, unser Gehör empfindet das als Verdopplung der Wiedergabelautstärke, ist die zugeführte Leistung um den Faktor 10 zu erhöhen.

Hier werden Wirkungsgradberechnungen mit dBs interessant, denn üblicherweise geben Händler und Hersteller den Wirkungsgrad ihrer Produkte in dB für 1 Watt und 1 m Abstand an. Der Wirkungsgrad errechnet sich aus den Leistungen (Eingangsleistung zu Ausgangsleistung). Eine Box mit 83 dB/1W/1m hat einen Wirkungsgrad von etwa 0,1 %; bei einer Box mit 93 dB/1W/1m beträgt der Wirkungsgrad ungefähr 1 %. Vergleicht man beide Boxen anhand der dB-Werte, ist der Unterschied anscheinend nicht sehr groß. Beim Vergleich der Wirkungsgrade ist es immerhin Faktor 10. Das bedeutet: Die leisere Box benötigt für den gleichen Schallpegel die 10-fache Leistung! Bei 20 dB Differenz (83 dB/1W/1m zu 103 dB/1W/1m) erhöht sich der Leistungsbedarf dann auf den Faktor 100. (Ist bei diesen Verhältnissen noch die Überlegung relevant, ob eine Leistungs-Endstufe beispielsweise 100 oder 150 Watt haben soll. Das ist ein Unterschied von nur 1,761 dB).

Etwas kniffliger als die Umrechnung von Schalldruck und Leistung wird es, wenn die Berechnung mit den Schalldruck-dBs in Räumen beginnt. Wenn wir einen Lautsprecher als punktförmige Schallquelle ansehen (bei tiefen Frequenzen eine gute Näherung), dann wird die Schallenergie kugelförmig um den Lautsprecher abgestrahlt. Diese Schallenergie erzeugt auf der Oberfläche einer Kugel, deren Radius wir zur Berechnung willkürlich wählen können, eine Schallintensität (in Watt/m²). Aus dieser läßt sich dann für jeden Punkt auf der Oberfläche der Schalldruck für den jeweiligen Radius (Abstand) berechnen. Mit einem gegebenen Lautsprecherwert (zum Beispiel 90 dB/1W/1m) lassen sich jetzt die Werte für größere oder kleinere Abstände direkt aus der entsprechenden Oberfläche der Kugel mit Hilfe des Radius (Abstand x) berechnen. Für die Oberfläche einer Kugel gilt.

$$A = 4\pi r^2$$

(A = Oberfläche der Kugel, r = Radius = Abstand x)

Nach der Formel ergibt der doppelte Abstand (Radius) die 4-fache Oberfläche, was die

Schallintensität pro Flächeneinheit auf 1/4 reduziert. Das Quadrat über r zeigt, daß die Schallintensität im Quadrat zur Entfernung zu- oder abnehmen wird. Auch der Schalldruck geht mit einem Quadrat in die Berechnung der Leistung ein:

$$P = \frac{p^2}{R}$$

Für die Leistung oder für den Schalldruck

$$p = \sqrt{P \cdot R}$$

Durch diese Zusammenhänge reduziert der 2-fache Abstand die Leistung auf ein Viertel, der 4-fache Abstand gar auf 1/16. Beide Werte heben sich dadurch gegenseitig auf. Der Schalldruck verhält sich wie die Entfernung: die 2-fache Entfernung reduziert den Schalldruck um die Hälfte, die 4-fache Entfernung reduziert ihn auf ein Viertel, usw. In vielen Veröffentlichungen heißt es, der Schalldruck sinkt im Quadrat zur Entfernung von der Schallquelle. Wie wir jetzt wissen, sinkt nicht der Schalldruck, sondern die Schallintensität. Hingegen nimmt die Leistung, die den Schalldruck konstant hält, im Quadrat zu.

Die logarithmische Rechenweise erlaubt die einfach Addition oder Subtraktion von dB-Werten. Das ist interessant, wenn es um den Schalldruck geht. Wird ein Lautsprecher von 90 dB/1W/1m in 2 Meter Abstand gemessen, bleiben von den 90 dB/1 W nur noch 84 dB pro Watt übrig:

$$\begin{aligned} 20\log 0,5 &= -6 \text{ dB} \\ 90 \text{ dB} - 6 \text{ dB} &= 84 \text{ dB} \end{aligned}$$

Bei 10 Meter Abstand wird der quadratische Einfluß noch deutlicher:

$$\frac{1}{10} = 0,1$$

$$\begin{aligned} 20\log 0,1 &= -20 \text{ dB} \\ 90 \text{ dB} - 20 \text{ dB} &= 70 \text{ dB} \end{aligned}$$

Um im zweiten Beispiel den Schalldruck wieder auf 90 dB zu erhöhen, muß die zugeführte Leistung um das 100-fache ansteigen. Manche

Hersteller geben den Wirkungsgrad von Lautsprechern mit dB in kleineren Abständen als 1 m an, so werden bei 0,5 m Abstand aus 90 dB/1W/1m verkaufsfördernde 96 dB. Das kann mit den gemachten Beispielen jetzt wohl jeder rechnerisch nachvollziehen.

Die Zusammenhänge lassen sich einfach merken: Jede Halbierung der Entfernung erhöht den Schalldruck um 6 dB und jede Verdopplung reduziert ihn um 6 dB. Jetzt sind auch die Leistungs-/Belastungs-Probleme bei größeren Musikveranstaltungen im Freien deutlich. Zur Wiedergabe eines großen Symphonie-Orchesters mit Hilfe von Hifi-Boxen (Wirkungsgrad 1 %), sind im Freien bei 10 m Abstand 50000 Watt (elektrisch) erforderlich, wenn auch die Impulsspitzen mit voller Dynamik reproduziert werden sollen. Bei lauterer Schallquellen benötigt das Quadrat allerdings eine Weile, bevor es sich durchsetzen kann. Eine startende Saturn-V Rakete kann etwa 50 Millionen Watt erzeugen, die sich in etwa 10 Kilometer Entfernung noch immer als ein Störgeräuschpegel von 100 dB bemerkbar machen.

Die folgende Tabelle zeigt diese Zusammenhänge:

13

Schalldruck p μ Pascal	Schallpegel SPL dB	Leistung akustisch, Watt	Leistung SWL dB
200.000.000	140	100.000.000	200
100.000.000	134	50.000.000	197
20.000.000	120	1.000.000	180
10.000.000	114	10.000	160
2.000.000	100	100	140
1.000.000	94	1	120
200.000	80		
100.000	74	0,01	100
20.000	60	0,0001	80
10.000	54	0,000001	60
2.000	40	0,00000001	40
1.000	34	0,0000000001	20
200	20	0,000000000001	0
100	14		
20	0		

Bild 2.13. Tabelle für Schalldruck und Leistung in dB.

SPL = Sound Pressure Level (Schalldruckpegel $\frac{p}{p_0}$)

Der Bezugspunkt p_0 ist 2×10^{-5} Pascal.

SWL = Sound Power Level (Schalleistungspegel $\frac{W}{W_0}$)

Der Bezugspunkt W_0 ist 10^{-12} Watt.

Eine Umrechnung der akustischen Leistung in einen Schallpegel mit einer Entfernung r (in Meter) erfolgt über den Leistungspegel:

$$\text{SPL} = \text{SWL} - 20 \log r - 10 \log 4 \pi$$

(für kugelförmige Abstrahlung)

$$\text{SPL} = \text{SWL} - 20 \log r - 10 \log 2 \pi$$

(für halbkugelförmige Abstrahlung)

Für ein Lautsprecherchassis mit 1 % Wirkungsgrad, einer Eingangsleistung von 1 W elektrisch (0,01 W akustisch) und einem Abstand von 1 Meter gilt bei halbkugelförmiger Abstrahlung:

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 100 \text{ dB} - 20 \log 1 - 10 \log 2 \\ &= 100 \text{ dB} - 0 - 7,89 = 92,1 \text{ dB} \end{aligned}$$

(Den Wert 100 dB entnehmen Sie der Tabelle in Bild 2.13.)

Die startende Saturn-V in 10 km Entfernung (10.000 m) hat noch folgenden Schallpegel:

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 197 \text{ dB} - 20 \log 10.000 - 10 \log 2 \\ &= 197 \text{ dB} - 80 - 7,89 = 109,1 \text{ dB} \end{aligned}$$

(Den Wert von 197 dB finden Sie in der Tabelle Bild 2.13 in der Spalte SWL für eine akustische Leistung von 50.000.000 Watt.)

Natürlich darf bei diesen großen Entfernungen nicht vergessen werden, daß die Luft auch Schallenergie absorbiert. Das macht sie aber vornehmlich bei hohen Frequenzen. Die sehr tiefen Frequenzen gelangen ohne große Abschwächung über weite Entfernungen. Der Effekt ist jedem von einem heranziehenden Gewitter bekannt. So bleiben von den theoretischen 109,1 dB noch etwa 100 dB aus dem Frequenzband unter 600 Hz übrig. Der quadratische Einfluß geht auch dann nicht verloren, wenn man den Schallpegel und den Abstand nur für Teile der Kugeloberfläche berechnet, z.B. für eine Halb- oder Viertelkugel. Die Berechnung von SPL mit Hilfe der abgestrahlten Leistung SWL zeigt das deutlich, da für die verschiedenen Abstrahlwinkel immer nur ein konstanter Wert von SWL abgezogen wird. Es sind die Werte:

Kugel	$10 \log 4 \pi = 11 \text{ dB}$
Halbkugel	$10 \log 2 \pi = 8 \text{ dB}$
Viertelkugel	$10 \log 1 \pi = 5 \text{ dB}$

Die Verhältnisse ändern sich erst bei anderen Abstrahlcharakteristiken der Schallquelle. Es gibt ja sogenannte Linienschallquellen, einer gut befahrenen Autobahn vergleichbar, deren Schallpegel bei einer Verdopplung der Entfernung nur um 3 dB absinkt. Auch bei Lautsprecherchassis mit großen rechteckigen Membranen kann es hier zur Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Werten kommen. Für fast alle Lautsprecher ist aber das Modell der punktförmigen Quelle richtiger, so daß das quadratische Abstandsgesetz anwendbar ist. Wie verändert sich jetzt der Schalldruck einer solchen Schallquelle, wenn die Schallabstrahlung statt kugelförmig nur noch über eine Halbkugel erfolgt? Diese Frage ist interessant, denn einige Hersteller geben den Schallverlauf in einem reflektionsarmen Meßraum (schalltoter Raum) an, andere dagegen veröffentlichen Werte für die Abstrahlung über eine Halbkugel (Box auf dem Boden). Daneben werden Lautsprecherchassis in unendlichen Schallwänden gemessen; bei dem Einbau in eine solche Schallwand kann die Schallabstrahlung einer Membranseite nur über eine Halbkugel erfolgen. Unendlich heißt hier, mindestens so groß, wie die zuständige DIN- oder IEC-Norm vorschreibt. Das ist meist sehr viel größer als die Schallwand einer Lautsprecherbox.

Wenn ein Lautsprecherchassis statt in die Normschallwand in ein Boxengehäuse eingebaut wird, beeinflußt das den Wiedergabefrequenzgang des Chassis, denn jetzt kann kugelförmige Abstrahlung möglich sein. Damit verdoppelt sich die Oberfläche, über die sich die Schallenergie verteilen kann, entsprechend halbiert sich die Schallintensität auf der Oberfläche. Der Einfluß einer Halbierung der Leistung auf den Schalldruck ist bereits bekannt, der Schalldruck verringert sich um 3 dB.

$$p = 20 \log \sqrt{\frac{0,5}{1}} = -3 \text{ dB}$$

Soweit ganz gut. Die Messung einer Lautsprecherbox unter den verschiedenen Bedingungen zeigt jedoch eine Differenz von 6 dB in der Wiedergabekurve für tiefe Frequenzen, aber kaum Unterschiede im Mitteltonbereich. Warum? Weil bei der Aufstellung auf dem Boden

zwei verschiedene Effekte auftreten, die den Schallpegel zu tiefen Frequenzen jeweils um 3 dB anheben. Einerseits war unsere Annahme von der kugelförmigen Abstrahlung nicht ganz korrekt, denn ab einer bestimmten Frequenz wirkt bereits die Schallwand der Box als unendliche Schallwand. Das reduziert den Abstrahlwinkel auf 180 Grad, d.h. es kann keine kugelförmige Abstrahlung stattfinden. Folglich ändert sich bei der Messung im reflektionsarmen Meßraum an diesen Frequenzen nichts.

Bei tieferen Frequenzen vergrößert sich der Abstrahlwinkel, so daß der Einfluß der Bodenreflektion entfällt. Der Einfluß einer schallharten Wand auf die Wiedergabekurve einer Lautsprecherbox ist ja bereits bekannt. Frequenzen mit großen Wellenlängen (λ zu Abstand größer Faktor 3) werden bereits um 3 dB verstärkt. Sie können diese Reflektionen, die wir anhand von virtuellen Schallquellen kennengelernt haben, als Vergrößerung der Membranfläche betrachten. Die echte Membran wird durch die eingespeiste elektrische Leistung bewegt; z.B. um 1 cm vor- und rückwärts. Mit ihrem Spiegelbild zusammen bewegt sich jetzt die doppelte Membranfläche um 1 cm vor- und rückwärts, wobei sich die nutzbare abgestrahlte Leistung verdoppelt.

$$p = 20 \log \sqrt{\frac{2P}{P}} = +3 \text{ dB}$$

Ohne Bodenreflektion fehlen diese 3 dB bei der Wiedergabe. Falls jetzt eine Lautsprecherbox mit einer linearen Wiedergabekurve (das gilt nach Herstellerangaben für die Bodenaufstellung) in deutlich größerem Abstand von Boden und Wänden aufgestellt wird, kann es im oberen Baßbereich zu einer kugelförmigen Abstrahlung kommen. Andererseits ist der Abstand zum Boden für eine wirksame Reflektion noch zu groß ist. In diesem Fall verursachen die halbierte abgestrahlte Leistung pro Flächeneinheit und die fehlende Bodenreflektion eine Verringerung des Schallpegels um 6 dB. (Wieder eine der Macken einer einfachen Schallpegelmessung. Eine Messung der abgestrahlten Schalleistung würde nur 3 dB Differenz zeigen, das Fehlen der Bodenreflektion. Die Box strahlt ja immer noch die gleiche Leistung ab, nur gelangt diese nicht direkt in das Meßmikrofon.) Wenn Sie Messungen an speziellen elektroakustischen Wandlern wie

Elektrostaten und Bändchenlautsprechern (ohne vorgesehtes Horn) für tiefere Frequenzen vornehmen, dann gibt es noch einen anderen Grund für Schwankungen der Schalldruckwiedergabe bei konstanter Eingangsleistung. Bei diesen Wandlern dominiert die akustische Impedanz der Luft (Strahlungswiderstand und Blindwiderstand) über die mechanische Impedanz der (oft extrem leichten) Membran, so daß zwei Sprünge von 6 dB auftreten können. Das ist hier nur wegen der Vollständigkeit halber kurz angedeutet. Bei konventionellen Chassis (wenig Fläche und vergleichsweise viel Gewicht) sind die Schwankungen des Abschlußwiderstandes Luft nur von geringer Bedeutung.

Zurück zu den Lautsprecherboxen und Chassis. Für Sie als Boxenkäufer oder Selbstbauer sind die Werte der Resonanzfrequenz f_s in Verbindung mit der Güte Q_t wichtige Daten, wenn es darum geht, die Boxen im Raum optimal aufzustellen bzw. für eine bestimmte Aufstellung die passenden Boxen zu bauen. Nach dem Motto "Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser" folgt noch an anderer Stelle, wie man die Herstellerangabe hierzu nachprüft und gegebenenfalls korrigiert.

Wirkungsweise

Bleiben wir zunächst beim Chassis. In Datenblätter zu Lautsprecherchassis findet man hin und wieder Werte für die mechanische Güte des Schwingkreises Masse/Feder. Diese Werte liegen mit Ausnahme bei einigen wenigen Hochtongchassis zwischen 2 und 6. Die mechanische Auslenkung der Chassis ist weitaus höher als erforderlich. Masse und/oder Federsteife sind recht groß, die Reibung ist dagegen sehr gering. Die Membranauslenkung des mechanischen Systems muß daher bei der Resonanzfrequenz regelrecht gebremst werden. Womit? Nun, mit dem Antriebs-System selbst, denn der Antrieb wirkt auch gleichzeitig als Bremse! Bei den Lautsprecherchassis ist das Antriebsprinzip auch umkehrbar. Hierfür sorgt die Induktion. Wird in einem Magnetfeld an einen Leiter eine Spannung u angelegt, dann bewegt sich der Leiter mit einer bestimmten Geschwindigkeit im Feld. Der Zusammenhang ist:

$$v = \frac{u}{B \cdot l \cdot z}$$

Diese Bewegung wiederum erzeugt in dem Leiter selbst eine Spannung. Für sie gilt:

$$u = B \cdot l \cdot v$$

u = induzierte Spannung

B = magnetische Flußdichte

l = wirksame Breite des Magnetfeldes

v = Leiterschwindigkeit im Magnetfeld

z = Anzahl der Leiter

Die induzierte Spannung ist der angelegten Spannung entgegengerichtet. Daraus folgt: Je schneller bei einem Lautsprecherchassis die Spule durch die angelegte Spannung im Magnetfeld bewegt wird, um so stärker ist die Gegeninduktion, die genau diese Bewegung verhindern will. (Diese Tatsache hat einen namhaften Hersteller dazu veranlaßt, die Anstiegszeit eines Mitteltonchassis ohne Gegeninduktion zu berechnen und dann diesen besseren Wert zu veröffentlichen.)

Das Bl -Produkt ist maßgeblich an beiden Vorgängen beteiligt, sowohl beim Antrieb wie auch bei der Gegeninduktion. Daraus ergibt sich für Lautsprecherchassis die in Bild 2.14 aufgezeigte Konsequenz.

Im ersten Fall ($Bl = 0,5 \times \text{Optimal}$) ist das Produkt für Antrieb und Bremse so gering, daß der Schallpegel bei der Resonanzfrequenz im Baßbereich wesentlich höher als im Mitteltonbereich ist. Man sieht deutlich die zu schwache Bremse im Baßbereich und den zu schwachen Antrieb im Mitteltonbereich (etwa 12 dB Differenz).

Im zweiten Fall verläuft die Kurve linear; hier ist das Bl -Produkt optimal. Im dritten Fall liegt das Bl -Produkt bei 2,0. Die Bremswirkung ist im Baßbereich zu stark, während im Mitteltonbereich die Antriebskraft sehr hoch ist. Es sind etwa 12 dB mehr Schallpegel im Mitteltonbereich, als im Bereich der Resonanzfrequenz. Autoren anderer Publikationen versuchen anhand dieser Kurven zu beweisen, daß ein zu großer Magnet ebenso falsch ist wie zu ein kleiner Magnet. Das stimmt so nicht, der Beweis ist einfach. Jeder Magnet erzeugt in einem Luftspalt eine definierte Flußdichte. Diese Flußdichte und die Länge des Spulendrahtes in dem Luftspalt erzeugen das Bl -Produkt. Will man nun die gleiche Flußdichte in einem höheren Luftspalt erhalten, oder benötigt man eine größere Flußdichte, da nur ein Teil der Spule im Luftspalt liegt, muß ein größerer

Magnet her. Da eine große lineare Auslenkung anders nicht zu erzielen ist und bei Tieftonchassis eines der wesentlichen Qualitätsmerkmale darstellt, gibt es sehr gute Gründe für große Magnete. Die Fehlinterpretation der Kurven liegt daran, daß hier das BI-Produkt mit dem magnetischen Gesamtfluß verwechselt wird. Es gibt für jedes Chassis zwar ein optimales BI-Produkt, aber keine optimale Magnetgröße. Mehr ist hier besser.

Wie errechnet sich das richtige BI-Produkt für ein bestimmtes Chassis? Berechnungsgrundlage ist die mechanische Güte des Systems. Sie errechnet sich aus der bewegten Masse, der Federsteife und der Reibung nach der Formel:

$$Q_{ms} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{R_{ms}}$$

Q_{ms} = mechanische Güte

M_{md} = bewegte Masse kg

R_{ms} = Reibung kg/s

f_s = Resonanzfrequenz Hz

In dieser Formel ist die Federsteife als Nachgiebigkeit der Membranaufhängung bereits in der Resonanzfrequenz f_s enthalten:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{md}}}$$

C_{ms} = Nachgiebigkeit m/N

Wie bereits erwähnt, liegt die Güte immer bei relativ hohen Werten von 2 bis 6. Für das Chassis ist die weitere Berechnung einfach. Die Gesamtgüte ist:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Q_{ts} = Gesamtgüte

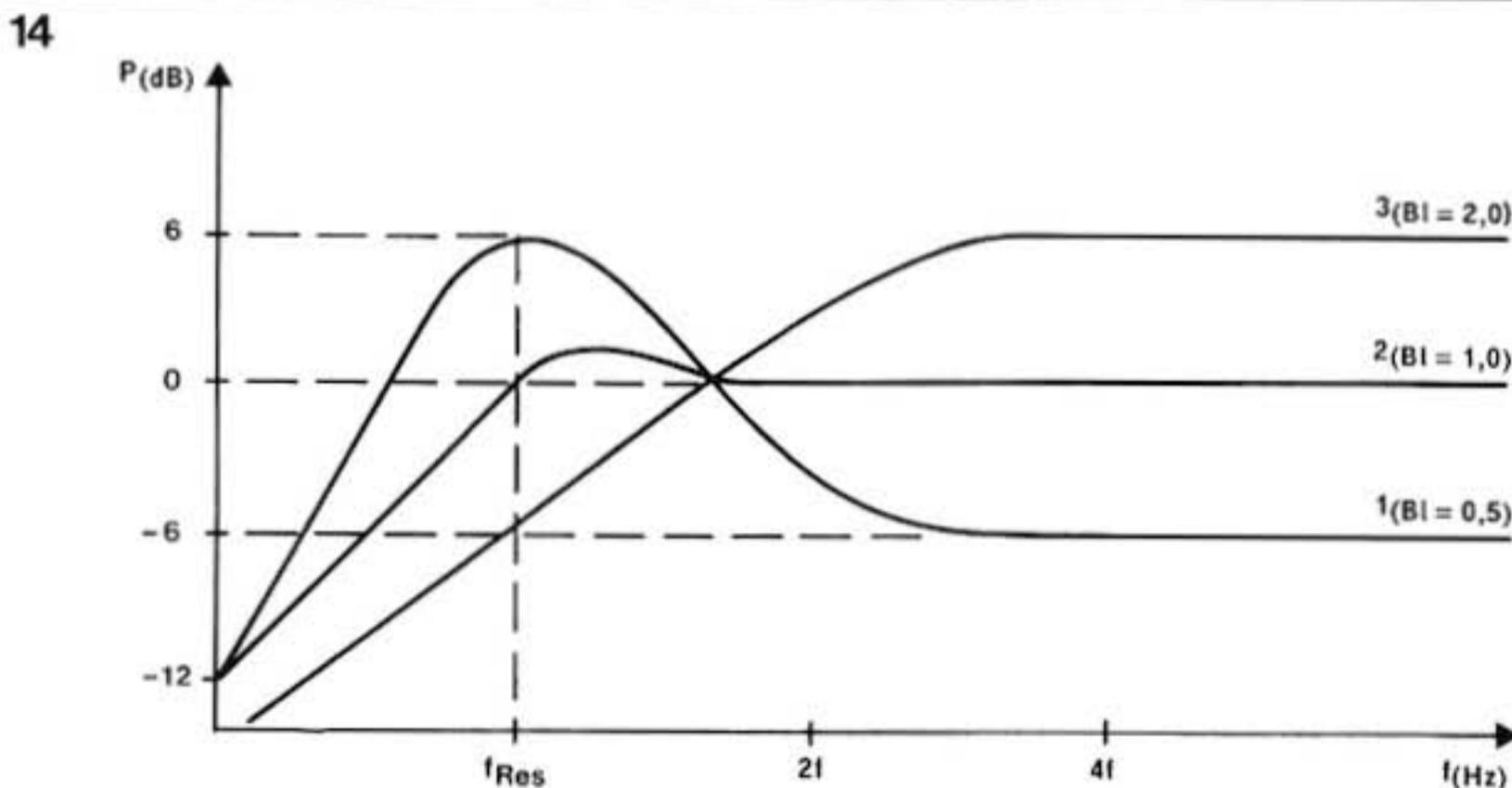
Q_{es} = elektrische Güte

Damit ergibt sich für Q_{es}

$$Q_{es} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{ts}} - \frac{1}{Q_{ms}}}$$

Die Güten Q_{ms} und Q_{es} sind hinsichtlich der Bremswirkung gleichberechtigt. Das heißt nicht, daß sie identisch sind. Dazu später mehr. Wenn der Gleichstrom-Spulenwiderstand bekannt ist, läßt sich das richtige BI-Produkt für die gewünschte Güte Q_{ts} leicht ermitteln. Dabei wird deutlich, daß eine große Masse für gleiche Ergebnisse ein höheres BI-Produkt benötigt als eine geringe bewegte Masse. Chassis mit leichteren Membranen müßten also bei gleichen Eigenschaften im

Bild 2.14. Die Wirkung der elektrischen Bremse abhängig von BI.



Baßbereich mit kleineren (preiswerteren) Magneten auskommen. Das ist auch so; aber jetzt kommt der Haken. In der Berechnung von Q_{ts} ist die Resonanzfrequenz enthalten. Wenn das Chassis in ein Gehäuse eingebaut wird, kann durch die Luft im Gehäuse eine weitere Federsteife in die Rechnung eingehen. Diese Federsteife hängt u.a. von der Membranfläche des Chassis ab und berechnet sich über das V_{as} (Volumen vergleichbarer Federsteife) des jeweiligen Chassis. Der Wert für V_{as} berechnet sich nach der Formel:

$$V_{as} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{ms} \cdot S_d^2$$

- ρ = Dichte der Luft (1,18 kg/m³)
- S_d = effektive Membranfläche in m²
- C_{ms} = Nachgiebigkeit in m/N (entspricht dem Kehrwert der Federsteife in N/m)
- c = Schallgeschwindigkeit 344 m/s

Das Volumen V_{as} entspricht der Federsteife des Chassis. Damit verdoppelt ein Gehäuse dieses Volumens V_{as} die Federsteife des schwingenden Systems. Das erhöht die Resonanzfrequenz um den Faktor 1/Wurzel 2. Bei einem Gehäusevolumen von $V_{as}/3$ verdoppelt sich die Resonanzfrequenz, denn die dreifache Federsteife S des Volumens plus der Federsteife des Chassis ergibt die vierfache Federsteife. S ist die Federsteife (Stiffness) der Membranaufhängung. Hier liegt eine Menge Ärger für alle Lautsprecher-Fans versteckt. Leichte Membranen mit niedriger Resonanzfrequenz benötigen sehr nachgiebige Membranaufhängungen. Das äußert sich in extrem großen Werten für V_{as} . Selbst beim Einbau in große Gehäuse ergibt sich eine deutliche Erhöhung der Resonanzfrequenz. Dabei errechnet sich die Einbauresonanzfrequenz, wir nennen sie f_c , nach der Formel:

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_{box} - 1}}$$

Die niedrige Resonanzfrequenz nimmt hier durch die zusätzliche Federsteife V_{box} einen sehr viel höheren Wert an. Wer das verhindern will und auch nach dem Einbau eines solchen Chassis mit sehr leichter Membran noch eine niedrige Resonanzfrequenz messen möchte, benötigt ein riesiges Gehäuse. Dafür kommt er mit wenig Magnetmaterial aus, da nur eine ge-

ringe Masse beschleunigt und gebremst werden muß. Für niedrige Resonanzfrequenzen in kleinen Gehäusen muß bei gegebener Membranfläche die bewegte Masse entsprechend höher sein. Sie verdoppelt sich bei der Halbierung des Gehäusevolumens. Das treibt allerdings die Magnetkosten kräftig in die Höhe, den Wirkungsgrad jedoch in den Keller.

Die Hersteller haben natürlich schon lange einen Ausweg gefunden, mit dem sie kleine Gehäuse und werbewirksame tiefe Resonanzfrequenzen unter einen Hut bekommen. Sie verkleinern die Membranfläche, womit sich natürlich auch die Werte von V_{as} verringern. Das führt allerdings zu sehr großen Membranauslenkungen bereits bei recht geringen Schallpegeln. Die daraus resultierenden Verzerrungen sind letztendlich ein Problem, mit dem sich der Käufer rumschlagen muß.

Bei allen passiven Lautsprecherkonstruktionen müssen gleichzeitig Chassis und Gehäuse berücksichtigt werden, und nicht nur die Daten der Chassis. Das resultierende Gehäusevolumen ist häufig genau so wichtig wie die -3 dB Frequenz, denn die Boxen sollen ja später nicht den ganzen Wohnraum füllen. Es gibt häufig Fälle, in denen sich der hohe Wirkungsgrad der Chassis in unvertretbaren Gehäusedimensionen niederschlägt. Es gibt aber auch Fälle, in denen zwar die Gehäuse recht handlich werden, die -3 dB Frequenz aber eher zu einem Mitteltonchassis paßt. Zur überschlägigen Berechnung gilt für geschlossene Boxen:

$$f_c : Q_{tc} = \text{konstant.}$$

Der Q_{tc} -Wert beträgt für einen linearen Schall-druckverlauf ungefähr 0,7.

Nach dem Einbau sollte der Q_{ts} -Wert auf den Wert Q_{tc} (etwa 0,7) angestiegen sein; die Resonanzfrequenz f_s steigt proportional mit auf den Wert f_c :

$$f_c = f_s \frac{0,7}{Q_{ts}}$$

Für einen gewünschten Wert von Q_{tc} stellt sich immer eine bestimmte Resonanzfrequenz f_c ein. Wollen Sie z.B. ein 38 cm Baßchassis mit $f_s = 24$ Hz und $Q_{ts} = 0,15$ durch ein geschlossenes Gehäuse auf $Q_{tc} = 0,71$ (meßtechnisch schön linear) bringen, dann erhöht sich die resultierende Resonanzfrequenz auf 113,6 Hz. Das ist für gute Baßwiedergabe

nun wirklich zu hoch. Aber das Gehäuse wird schön handlich. Andersherum wird ein 38 cm Chassis mit den Daten $f_s = 36 \text{ Hz}$ und $Q_{ts} = 0,65$ zwar eine sehr tiefe Baßwiedergabe liefern, aber das Gehäuse ist dann sehr unhandlich.

Für den Chassiskonstrukteur treffen bei diesen Berechnungen einige gegenläufige Forderungen aufeinander. Er muß die bestehenden Chassisbauteile verwenden, den Wünschen der Käufer Rechnung tragen (guter Klang und tiefer Baß aus kleinen Gehäusen) und natürlich den Rotstift der Kalkulationsabteilung im Auge behalten. Ein weniger gutes Chassis ist schnell gebaut: wenig Magnet und wenig Schwingspule in einem schmalen Luftspalt, schon stimmen BI-Produkt, Wirkungsgrad und Kalkulation. Von linearer Auslenkung kann dann allerdings keine Rede mehr sein.

Bei einem guten Chassisentwurf geht es darum, ob der Konstrukteur einen teuren Magneten gegen den Rotstift durchsetzen kann, oder ob der Hersteller dem Käufer eine höhere Stromrechnung zumuten will. Im ersten Fall bremst er das Chassis elektrisch. Wir können eine elektrische Bremse definieren, deren Wirkung der mit mechanischen Bremse R_{ms} völlig identisch ist.

$$R_{me} = \frac{(BI)^2}{R_{dc}}$$

R_{dc} = Gleichstromwiderstand der Spule

Der Einfluß des Magneten zeigt sich klar über die Flußdichte B im Luftspalt. Je größer B ist, um so größer wird auch R_{me} . Diese Bremse übernimmt im ersten Fall die Hauptarbeit, während die Reibungswiderstände nur einen kleinen Teil zur Bedämpfung des schwingenden Systems beitragen.

Im zweiten Fall wird die mechanische Bremse über R_{ms} zu einer wichtigen Ergänzung des Antriebes; der Wert für R_{ms} ist ähnlich hoch, wie der für R_{me} . Das kann nach verschiedenen Methoden realisiert werden. Ein klassischer Reibungswiderstand R_{ms} ist das Dämmmaterial im Lautsprechergehäuse, der aber leider meistens nicht ausreicht um das schwingende System zu bedämpfen. Werden aber daneben noch weitere Reibungswiderstände eingesetzt, einige davon kennen Sie vielleicht als Variovents, so wird es anders (Bild 2.14a). Hier wird das Gehäuse mit Öffnungen versehen,

die der Luft beim Durchgang einen hohen Strömungswiderstand entgegensetzen, so daß R_{ms} auf hohe Werte ansteigt. Anstelle der Variovents können das übrigens auch einfache Lochbleche sein, wenn die Berechnungen darauf abgestellt wurden.

Jetzt ist das Chassis nach dem Einbau bereits mechanisch beruhigt; die Güte Q_{mc} liegt im Bereich unter 2,0. Unter dieser Voraussetzung kommt der Konstrukteur mit sehr viel weniger Magnet aus, da R_{me} jetzt einen kleineren Wert annehmen kann um eine gewünschte Gesamtgüte zu erreichen.

$$Q_{tc} = \frac{2\pi \cdot f_c \cdot M_{md}}{R_{me} + R_{ms}}$$

In beiden Fällen steht jetzt noch die Entscheidung über die elektrische Belastbarkeit des Chassis aus. Einen Gleichstromwiderstand von z.B. 6,5 Ohm kann der Konstrukteur mit relativ wenig dünnem Draht ebenso erreichen wie mit etwas mehr dickerem Draht. Wenig dünner Draht erfordert ein kleines Luftspaltvolumen, dadurch ergibt sich der nötige Wert für B bereits bei kleinen Magneten. Mehr stärkerer Draht wirkt sich zwar positiv auf die BI-Rechnung aus, erfordert aber ein größeres Luftspaltvolumen, um die Spule darin unterzubringen. Da Volumen immer mit einem hoch 3 verbunden ist, verteuert das den Magneten sofort wieder, wenn die Flußdichte auf den richtigen Wert gebracht werden soll. Hätten

14a

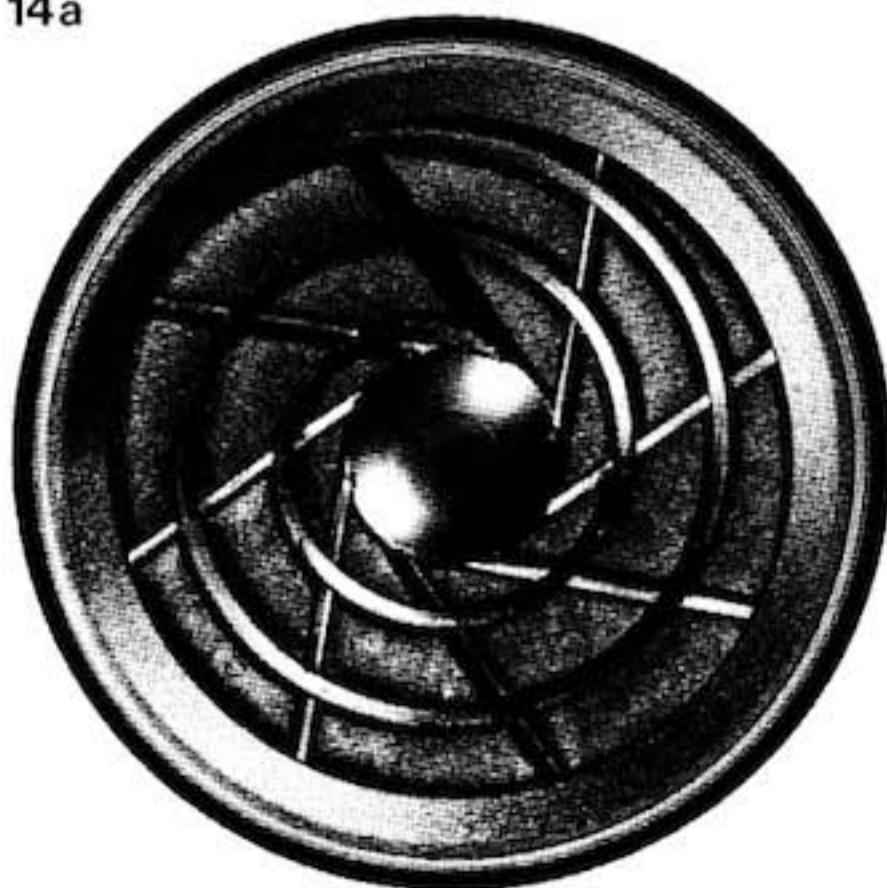


Bild 2.14a. Beispiel für einen Variovent.

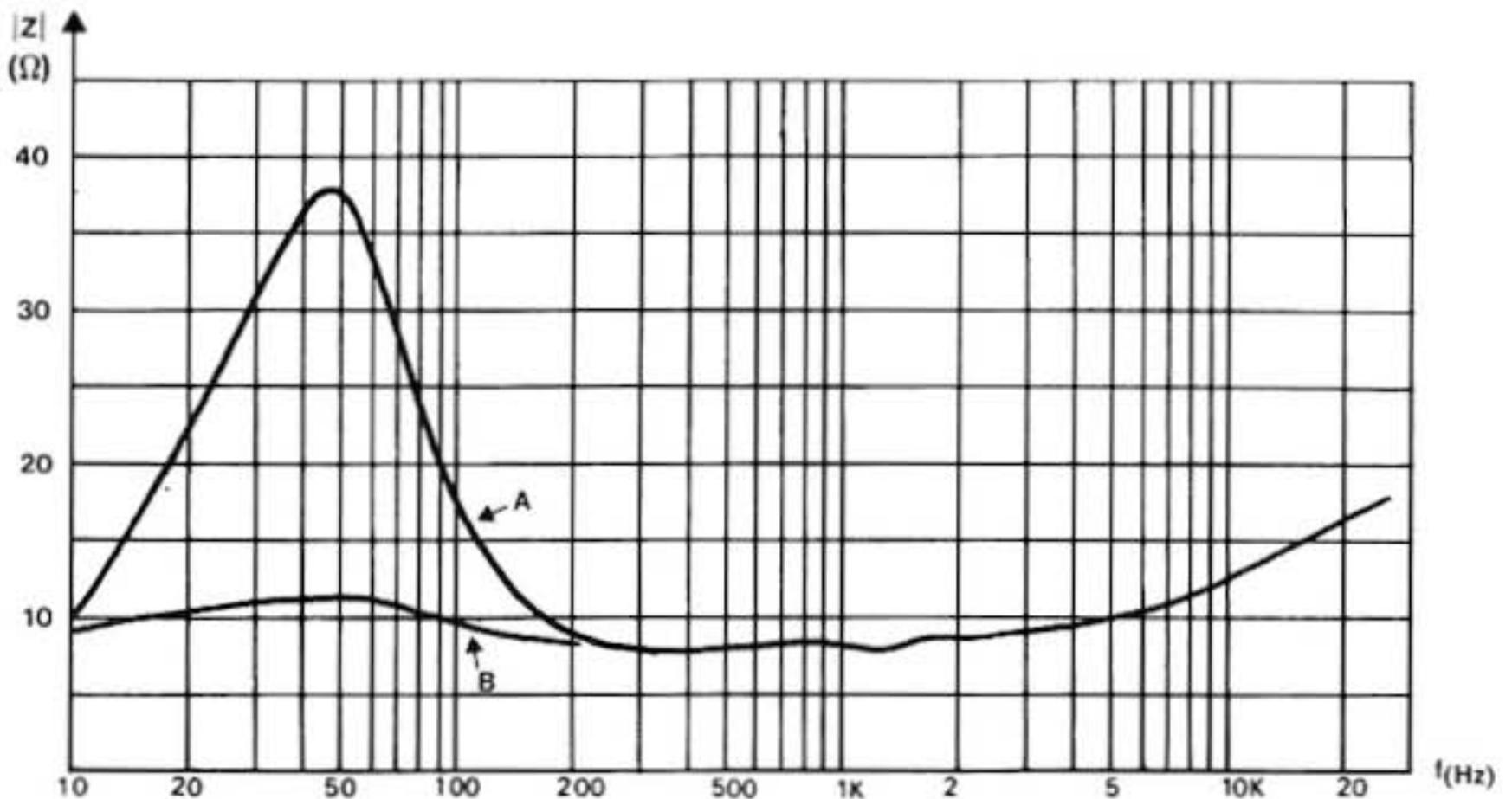


Bild 2.15. Unterschiedliche Impedanzkurven elektrisch und mechanisch gebremster Chassis.

A) Elektrisch gebremst, hohe Gegeninduktion

B) Mechanisch gebremst, fast keine Gegeninduktion

Sie vermutet, daß die Magnetgröße auch eng mit der Belastbarkeit zusammenhängen könnte? Bei sehr vielen Billigchassis ist an dieser Stelle der Rotstift angesetzt worden; es ist ja nicht direkt zu sehen. Kommen wir zu den Stromkosten und noch einigem mehr, das unter Hifi-Aspekten sicherlich interessanter ist. Das Diagramm in Bild 2.15 zeigt die Impedanzkurve (Widerstandsverlauf bei einer Messung mit Wechselstromsignalen verschiedener Frequenzen) eines elektrisch und eines mechanisch gebremsten Chassis. Die Impedanz, die wir mit Z bezeichnen, ist der frequenzabhängige Widerstand des Chassis (der Box), den der Verstärker sieht.

Der Gleichstromwiderstand beider Chassis beträgt 6,5 Ohm, aber beide Kurven unterscheiden sich deutlich. Die Impedanzkurve (A) des elektrisch gebremsten Chassis zeigt eine starke Überhöhung bei der Resonanzfrequenz. Hier wird die Gegeninduktion des starken Antriebes sichtbar. Das mechanisch gebremste Chassis zeigt dagegen, mangels größerer Menge Magnet, keine ausgeprägte Gegenin-

duktion (B).

Die Gegeninduktion spiegelt sich übrigens deshalb in der Impedanzkurve wieder, weil jede Eingangsspannung die vom Chassis erzeugte gegenphasige Spannung als zusätzlich zu überwindenden Widerstand sieht. Das Maximum der Gegeninduktion befindet sich bei der Resonanzfrequenz, weil hier die Auslenkung der Membran und damit die erzeugte Gegeninduktion die größten Werte erreicht.

Die elektrische Bremse des Chassis ist eine Strombremse! Durch den höheren Widerstand bei tiefen Frequenzen begrenzt das Chassis den Strom, der bei einer bestimmten Spannung an den Ausgangsklemmen des Verstärkers durch die Schwingspule fließt.

Bei der gezeigten Impedanzkurve sieht das so aus: Spannung an den Klemmen des Verstärkers 28,3 V (das entspricht 100 Watt an 8 Ohm). Im Mitteltonbereich fließt ein Strom von $28,3 : 8 = 3,53$ Ampere. Im Baßbereich bei der Resonanzfrequenz sinkt der Strom beträchtlich ab. Es sind nur noch $28,3 : 36 = 0,79$ Ampere. Um also bei der Resonanzfrequenz die gleiche Wirkung zu erreichen, ist nur noch ungefähr ein Viertel des ursprünglichen Stromes erforderlich. Von den 100 Watt sind nur noch 22,25 Watt notwendig. (Die Zahl 36 ergibt sich aus dem Diagramm in Bild 2.15 und ist die Impedanz bei der Resonanzfre-

quenz.) Die Box hat also im Baßbereich gegenüber dem Mitteltonbereich einen um den Faktor 4 besseren Wirkungsgrad.

Bei der mechanisch gebremsten Version wird dagegen alle Energie im Reibungswiderstand vernichtet. Das Chassis benötigt bei der Resonanzfrequenz ebenso die 100 W wie im Mitteltonbereich. Da die meiste Schallenergie im Baßbereich erzeugt werden muß, belastet eine mechanisch gebremste Box den angeschlossenen Verstärker erheblich mehr. Anders gesagt: Eine Box mit hohem Wirkungsgrad und flacher Impedanzkurve belastet einen Verstärker für gleichen Schalldruck mehr als eine Box mit niedrigem Wirkungsgrad und kräftiger Impedanzüberhöhung. Vergessen Sie also den Begriff Wirkungsgrad, solange der Box keine Impedanzkurve beiliegt.

Testen Sie die Boxen immer mit Ihrem Verstärker! Einige Verstärker liefern wenig Ausgangsspannung, aber dafür viel Strom. Das ist für mechanisch gebremste Boxen-Konstruktionen mit geringer Impedanzüberhöhung sehr vorteilhaft. Andere Verstärker liefern hohe Spannungen, aber nur wenig Strom (z.B. Röhrenverstärker, aber auch viele transistorisierte Exemplare). Denen geht bei der Ansteuerung mechanisch gebremster Boxen schnell die Luft aus.

Gegen den Spruch "Intelligenz statt dicker Magnete" ist zwar nichts einzuwenden, aber daß er nicht grundsätzlich gilt, haben die angestellten Überlegungen wohl bewiesen. (Leider schlägt sich diese Intelligenzleistung auch in keinem Preisvorteil nieder.) Jetzt ist klar, warum einige Verstärker mit manchen Boxen eine wunderschön saubere Baßwiedergabe liefern, während sie mit anderen Boxen völlig überfordert sind und die Baßwiedergabe auch bei geringen Schallpegeln nicht mehr so recht überzeugt.

Das zur Güte und den Impedanzkurven. Bisher haben diese Betrachtungen aber noch ein kleines Manko. Sie gelten zwar für alle Lautsprecherchassis, solange sich Spule und Membran fast nicht bewegen. Bei größeren Auslenkungen gelten sie für die meisten Chassis nicht mehr. Werfen Sie einen Blick auf eine preiswerte Konstruktion in Bild 2.16.

Der Luftspalt ist nur geringfügig höher als die Spule. Bei größeren Auslenkungen gerät ein Teil der Spule unweigerlich aus dem Luftspalt. Was passiert? Die Antriebskraft der Spule nimmt zu! Das BI-Produkt übersetzt die me-

chanischen Werte des Masse/Feder-Systems in elektrische Werte. So auch die mechanische Impedanz Z_{me} der Chassis in eine elektrische Z_{el} . Die Formel hierfür lautet:

$$Z_{el} = \frac{(Bl)^2}{Z_{me}}$$

Berechnen wir das einmal für $B = 1,0$ T und $l = 12$ m. Die mechanische Impedanz des Chassis ist 4 Ohm. Die elektrische Impedanz beträgt demnach

$$Z_{el} = \frac{(1,0 \cdot 12)^2}{4} = 36 \text{ Ohm}$$

Bei einer Spannung von beispielsweise 28 V und einem Gleichstromwiderstand R_{dc} von 6,5 Ohm hat der Strom in der Spule eine Stärke von 0,66 Ampere (U dividiert durch $Z_{el} + R_{dc}$). Daraus folgt für die Antriebskraft F der Spule:

$$F = Bl \cdot I$$

$$F = 12 \cdot 0,66 = 7,9 \text{ Newton}$$

Nun die Rechnung für den Fall, daß die Spule den Luftspalt halb verlassen hat. Die Spulenlänge im Luftspalt beträgt dann nur noch 6 m; alles andere bleibt gleich.

$$Z_{el} = \frac{(1,0 \cdot 6)^2}{4} = 9 \text{ Ohm}$$

Bei 28 V Spannung ist der Strom in der Spule jetzt 1,8 Ampere. Daraus folgt für die Antriebs-

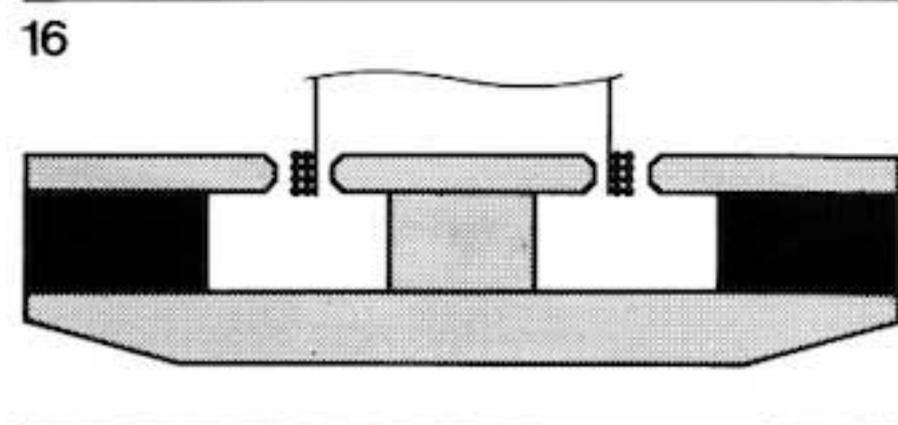


Bild 2.16. Schwingspulenträger mit Kurzhubspule. Der Luftspalt ist nur geringfügig höher als die Wickelhöhe der Schwingspule.

Der Konstrukteur erzielt so ein hohes BI-Produkt mit wenig Magnet. Leider auch nur wenig lineare Auslenkung.

kraft der Spule:

$$F = BI \cdot l$$

$$F = 6 \cdot 1,8 = 10,8 \text{ Newton}$$

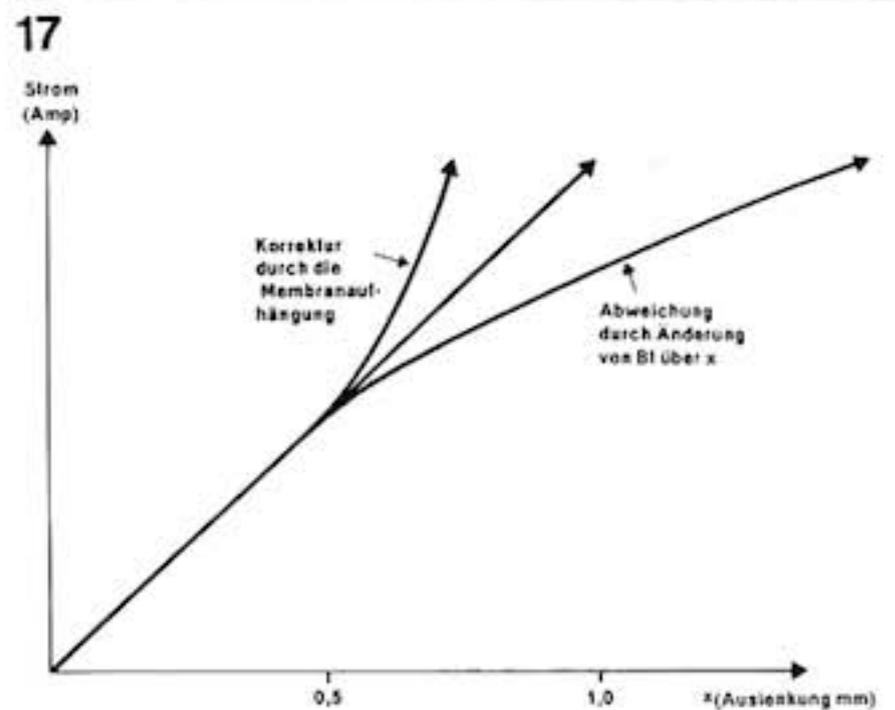
Halbiert man in dieser Situation für das 4 Ohm Chassis auch noch den Gleichstromwiderstand R_{dc} von etwa 6,5 Ohm auf 3,2 Ohm, ist das Ergebnis noch extremer. Die Erkenntnis aus dem Rechenbeispiel ist simpel, aber sehr gefährlich für solche Kurzhubchassis. Die Auslenkung der Spule wird positiv nichtlinear. Je größer die Auslenkung ist, um so größer wird die Kraft für noch weitere Auslenkung. Dieser simple Zusammenhang ist die Ursache dafür, daß von zehn kleineren Baßreflexboxen nur eine auch bei lauterem Pegeln noch gut klingt. Sehr viele Hersteller und Hobby-Konstrukteure berechnen die Baßreflexboxen nach den bekannten Berechnungsmodellen von A.N. Thiele & R.H. Small. Dabei sind die Werte für Q_t und BI Ausgangspunkt aller Gehäuseberechnungen. Weniger gute Lautsprecherchassis brauchen hier für jede Schwingspulenposition ein anderes Gehäuse, wenn eine optimale Abstimmung erhalten bleiben soll. Das ist natürlich schwierig zu bewerkstelligen.

Freunde des Baßreflexprinzips werden jetzt damit kontern, daß durch dieses Prinzip die nötigen Auslenkungen der Membran für einen gegebenen Schalldruck deutlich reduziert würden und somit keine Probleme entstehen könnten. Deutlich reduziert heißt aber, nicht völlig verhindert; wie deutlich (mehr oder weniger) zeigt sich noch.

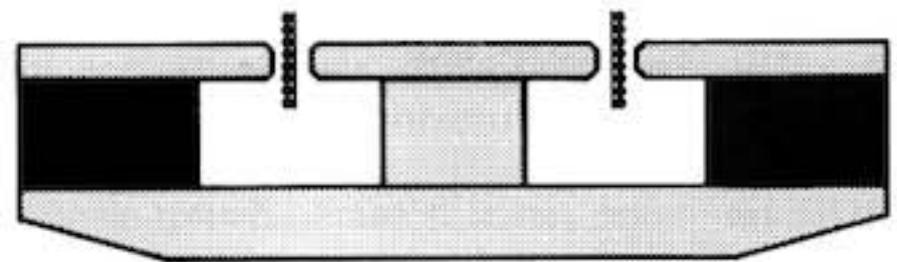
Um das nichtlineare Verhalten des Antriebes zu verhindern, gibt es zwei Möglichkeiten (Bild 2.17). Bei der eleganteren setzt der Konstrukteur eine Membranaufhängung ein, die ein positiv nichtlineares Verhalten des Antriebes durch eine entgegengesetzte Kennlinie eliminiert. Nachteilig daran sind die hohen Entwicklungskosten (weshalb solche Chassis sehr selten sind) und weiterhin, daß die schöne Kompensation nur mit einem bestimmten Gehäusevolumen (weitere Feder) optimal arbeitet. Das allerdings auch nur, solange nichts ausleiert.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Luftspalt höher als die Spule auszulegen bzw. umgekehrt; also eine lange Spule in einem flacheren Luftspalt einzusetzen (Bild 2.18).

Bei dieser Lösung kostet jeder Millimeter zusätzliches Geld. Ist nur ein Teil des Spulendrahtes im Luftspalt, dann muß die Flußdichte



18a



b

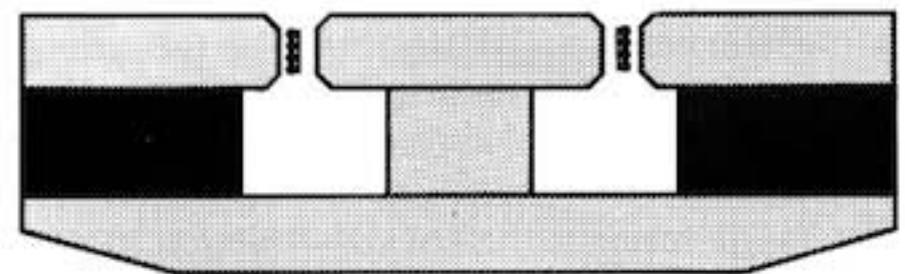


Bild 2.17. Die Nichtlinearität eines Lautsprecher-Antriebes mit kurzer Schwingspule kann durch eine entgegengesetzte Nichtlinearität der Membranaufhängung kompensiert werden. So wird große lineare Auslenkung mit hohem Wirkungsgrad kombiniert.

Bild 2.18. Bei der Konstruktion a ist die Schwingspule so lang, daß sie zu beiden Seiten aus dem Luftspalt herausragt. Bei b ist es umgekehrt; dort ist der Luftspalt wesentlich höher als die Schwingspule. Beides sind klassische Langhubkonstruktionen. Version a ist die preiswerte Lösung, hat aber nur einen geringen Wirkungsgrad. Version b kann dagegen sehr teuer werden, bietet dann aber auch einen hohen Wirkungsgrad.

B kräftig erhöht werden. Ist der Luftspalt sehr groß, muß für ein ausreichendes B der Magnet sehr kräftig sein. Sie müssen akzeptieren, daß diese Chassis relativ teuer sind. Dafür bekommen Sie dann z.B. ein 30 cm Chassis, das bedeutend mehr Luft linear bewegen kann, als billige 38 cm Chassis. Zusätzlich kommen sie wegen der kleineren Membranfläche auch noch mit 1/3 des Gehäusevolumens aus. Wenn Sie jetzt wieder (oder noch immer) an den Wirkungsgrad denken, vergessen Sie folgendes nicht: Langhubchassis haben immer einen recht niedrigen Wirkungsgrad. Kurzhubchassis mit hohem Wirkungsgrad brauchen zwar wesentlich weniger Leistung, verzerren aber bereits bei sehr viel geringeren Schallpegeln, wenn tiefere Frequenzen im Spiel sind. (Nur bei Hornlautsprechern ist das anders, wie so ziemlich alles andere auch.)

Zum Thema Schwingspulen noch einige abschließende Worte. Die elektrische Belastbarkeit ist eines der umstrittensten Themen in Verbindung mit Schwingspulen überhaupt. Jeder Hersteller verkauft seine Lösung als die Beste. Lassen Sie sich nicht beirren. Es zählt hier die Präzision der Fertigung, weniger das Material. Ist man nicht sicher, ob ein Chassis eine höhere Belastung lange übersteht, muß gemessen werden. Jede elektrische Belastung der Spule erhöht deren Arbeitstemperatur; das wiederum verändert den Gleichstromwiderstand.

Der Temperaturkoeffizient von Aluminium und Kupferspulen liegt bei etwa 0,004 Ohm/Grad Celsius. Hat also eine Schwingspule im kalten Zustand einen Gleichstromwiderstand von 6,2 Ohm, im Betrieb dagegen 12,4 Ohm (beim Messen Box kurz abklemmen bzw. Schalter für Messung in die Zuleitung bauen), muß man die Leistung etwas reduzieren. Die Spule hat dann eine Temperatur von etwa 270 Grad. Das hält kein Spulenträger und Klebstoff lange aus. Sie sollten grundsätzlich vor Messungen an Lautsprecherchassis den Gleichstromwiderstand überprüfen, damit die Meßwerte nicht versehentlich durch zu hohe Temperaturen der Schwingspule verfälscht werden. Berechnen Sie doch einmal Q_{tc} für $R_{dc} = 6,2 \text{ Ohm}$ und für $R_{dc} = 12,4 \text{ Ohm}$.

Nur mit engsten Toleranzen bei der Konstruktion und Fertigung ist es möglich, die in der Schwingspule erzeugte Wärme so schnell wie möglich über das Magnetmaterial und die Membran abzuleiten. Und nur mit besten

Klebstoffen können Verbindungen geschaffen werden, die mit der Betriebstemperatur bei einer elektrischen Überlastung einige Zeit leben können. Es gibt preiswerte Chassis, deren 10 cm Schwingspulen nur den Bruchteil der Belastbarkeit einer guten 5 cm Konstruktion aufweisen, die Herstellerangabe über die elektrische Belastbarkeit eines Lautsprecher-Motors ist immer nur dann glaubwürdig, wenn auch eine Zeitangabe mitgeliefert wird.

Als letzte Überlegung noch die Frage: Ist Aluminium oder Kupferdraht besser? Über diesen Punkt entscheidet die Konstruktion des Chassis. Wenn ein Lautsprecherchassis bei höheren Frequenzen mit optimalem Wirkungsgrad arbeiten soll, dann muß die Masse der Membran gleich der Masse der Schwingspule sein. Es wird daher bei Breitbandchassis mit großen Schwingspulendurchmessern für ausreichende Belastbarkeit immer eine leichte Aluminiumspule nötig sein, während bei Hochtonchassis oft eine Kupferspule bessere Ergebnisse bringt. Überlassen Sie die Klärung dieser Frage dem Chassiskonstrukteur, er sollte wissen was er macht. Nehmen Sie außerdem die Werbung in diesem Punkt nicht so ernst. Leichter ist nicht immer gleich besser.

Magnetsysteme für Lautsprecherchassis

Hier geht es um einen Punkt, der gerade für Selbstbauer immer wieder sehr interessant ist. Es sieht so aus, als wäre der Magnet das wichtigste Bauteil jedes Lautsprecherchassis, aber das ist nicht so. Wie bereits erwähnt, ergibt sich je nach nötiger Flußdichte und gewünschtem linearem Hub ein benötigter magnetischer Gesamtfluß, den das Magnetmaterial aufweisen muß. Da es gutes und weniger gutes Magnetmaterial gibt (besser billiges und teureres Material), kann ein kleiner Magnet das gleiche leisten wie ein größerer Typ. Wer die Magnetgüte nach Volumen beurteilt, ist auf dem Holzweg. Etwas aussagekräftiger sind hier die Herstellerangaben über den Gesamtfluß; gewöhnlich wird der Wert in Weber oder Maxwell angegeben. Damit lassen sich Größe und Leistung verschiedener Magnete vergleichen.

Interessanter ist für den interessierten Lautsprecher-Fan schon das Verhältnis von Gesamtfluß zu Luftspaltvolumen und Fluß-

19

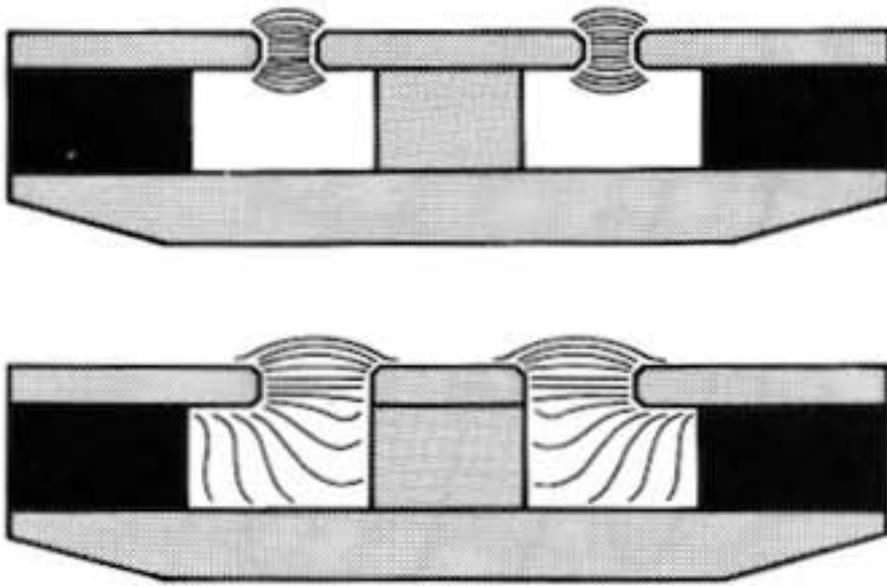


Bild 2.19. Bei schlechteren Magnetkonstruktionen kann ein sehr großer Teil der magnetischen Energie in störenden Streufeldern verschwinden. Beim oberen Magnetsystem ist der magnetische Fluß fast vollständig im Luftspalt konzentriert, während beim unteren System große Streuverluste auftreten.

dichte im Luftspalt. Die Zeichnungen in Bild 2.19 zeigen ein gutes und ein schlecht konstruiertes Magnetsystem.

Gut zu erkennen ist, daß bei dem schlechten Magnetsystem ein Großteil der Feldlinien nicht im Luftspalt konzentriert ist, sondern als Streufeld eigene Wege geht. Es gibt dabei Magnetsysteme, die so schlecht konstruiert sind, daß nur 1/8 des gesamten magnetischen Flusses im Luftspalt genutzt werden! Den genauen Zusammenhang zwischen Gesamtfluß, Luftspaltvolumen, Flußdichte und Streufeld beschreibt die folgende Formel:

$$E = \frac{(B_L)^2}{\mu_0} \cdot \frac{V_L}{V_M} \cdot \sigma \cdot \tau$$

In der Formel bedeuten:

E = Energieprodukt des Magneten

B_L = Flußdichte im Luftspalt

(B_L nicht mit dem BI-Produkt verwechseln)

V_M = Magnetvolumen

V_L = Luftspaltvolumen

σ = Streufaktor = (σ griechischer Kleinbuchstabe Sigma)

τ = Widerstandsfaktor etwa 1

(τ griechischer Kleinbuchstabe Tau)

μ = magnetische Feldkonstante
 $1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$ (μ griechischer Kleinbuchstabe My)

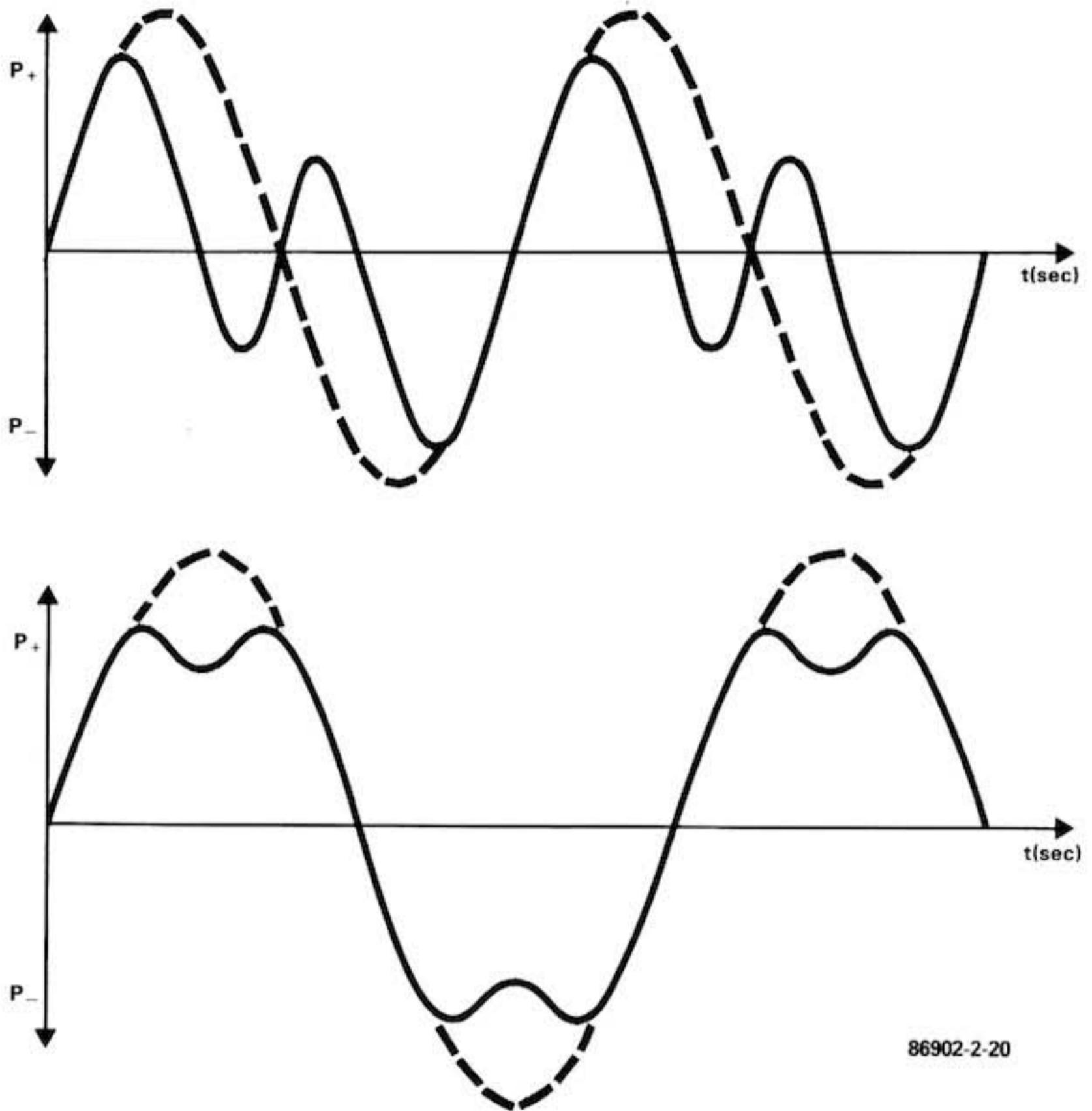
Ein größeres Luftspaltvolumen erfordert für gleiches BI-Produkt auch einen größeren Magneten (bei gleichem Material, Energieprodukt $E = \text{konstant}$). Dagegen ist nichts zu sagen. Ein weniger gut konstruiertes Magnetsystem benötigt aber für ein geringeres BI-Produkt einen größeren Magneten. Das ist zwar werbewirksam, doch verursacht das Streufeld erhebliche Verzerrungen!

Es ist leicht einzusehen, daß die Bewegung einer Schwingspule in einem schlecht konstruierten Magnetsystem nicht gerade besonders linear sein kann. Bewegt sich die Spule nach innen, so gerät sie mehr und mehr in das Streufeld. Dadurch verhalten sich Antriebskraft und Gegeninduktion völlig anders, als bei einer Bewegung nach außen. Es entsteht eine unsymmetrische Nichtlinearität, die auch als Klirrfaktor k_2 bekannt ist. Dieser Faktor k_2 bedeutet, daß bei einer Bewegung mit der Frequenz X zusätzlich eine neue Frequenz (zweimal X) erzeugt wird. Ist der Grundton beispielsweise 40 Hz, werden starke Anteile der Frequenz 80 Hz erzeugt. Das ergibt subjektiv eine stärkere Baßwiedergabe. Manche Hersteller benutzen diese Tatsache als Verkaufshelfer. So schön das auch klingen kann, es ist nicht gerade originalgetreue Baßwiedergabe. Das Bild 2.20 zeigt diese unsymmetrischen Verzerrungen k_2 .

Ein paar kurze Worte zum Magnetmaterial. Die Abbildungen (Bild 2.20a) zeigen die Entwicklung von Lautsprecher Magneten für gleiche Flußdichte bei gleichem Luftspalt in den Jahren 1932 bis 1958 (die große Zeit der Alnico Magnete).

Welcher Magnet ist jetzt der beste? Technisch gesehen ist keiner besser als der andere. Aber eigenartigerweise hält fast jeder Hifi-Fan die Alnico-Magnete gegenüber Ferrit-Magneten für besser. Viele Lautsprecherchassis mit solchen Alnico-Magneten haben noch immer einen legendären Ruf, was sich in den Preisen deutlich zeigt (die Chassis sind gebraucht erheblich teurer als neu). Ob das so richtig ist, wo doch auch die renommiertesten Hersteller schon vor Jahren Alnico-Magnete aus ihren Chassis verbannt haben?

Die Leistungsfähigkeit jedes Magnetmaterials beschreibt das jeweilige Energieprodukt. Alnico 30/14 (DIN 17410) hat ein Energieprodukt



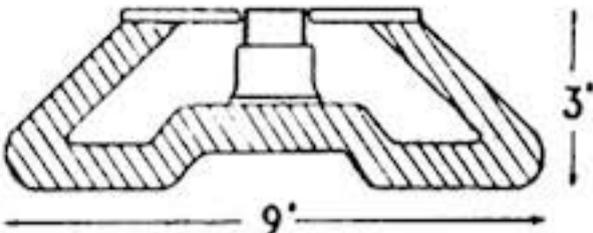
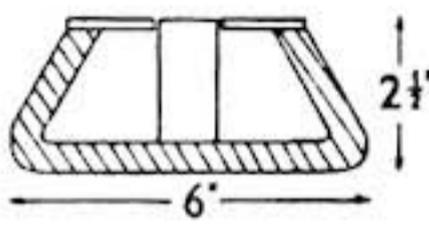
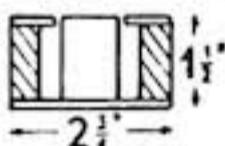
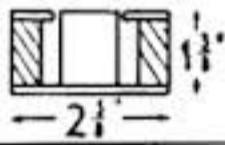
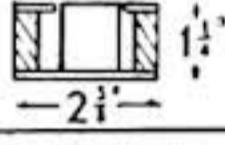
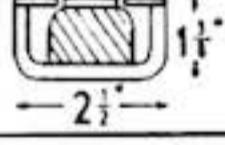
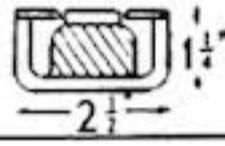
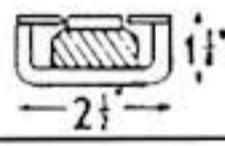
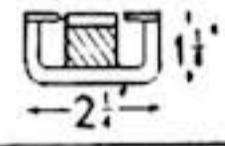
86902-2-20

Bild 2.20. Die harmonischen Verzerrungen k_2 (oben) und k_3 (unten) sind in Phase zum Grundton abgebildet. Der Grundton ist gestrichelt gezeichnet.

von 40 kJ/m^3 (Kilojoule pro Kubikmeter). Für normale Ferritwerkstoffe sind Werte um 25 kJ/m^3 üblich. Es genügt also weniger Volumen Alnico-Werkstoff für die gleiche Leistung (allerdings ist es teurer). Es gibt mittlerweile auch Werkstoffe mit Energieprodukten von über 100 kJ/m^3 , z.B. Kobalt-Samarium-Magnete u.a. Die könnten alternativ zu Alnico

eingesetzt werden, zumindest von Perfektionisten, für die der Preis eine untergeordnete Rolle spielt. Aber es macht keiner.

Ein Blick auf die Entstehung eines Magneten: Generelle Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien gibt es nicht. Deutlich ist nur, daß mit Alnico höhere Flußdichten möglich sind als mit Ferritwerkstoffen. Es sind leider nicht allein die Streufelder, die bei einem Magnetsystem Verzerrungen erzeugen können. Da jeder Strom in der Schwingspule ein Magnetfeld erzeugt, kann es zu einer Modulation der Flußdichte im Luftspalt kommen, wobei sich die Magnetfelder gegenseitig

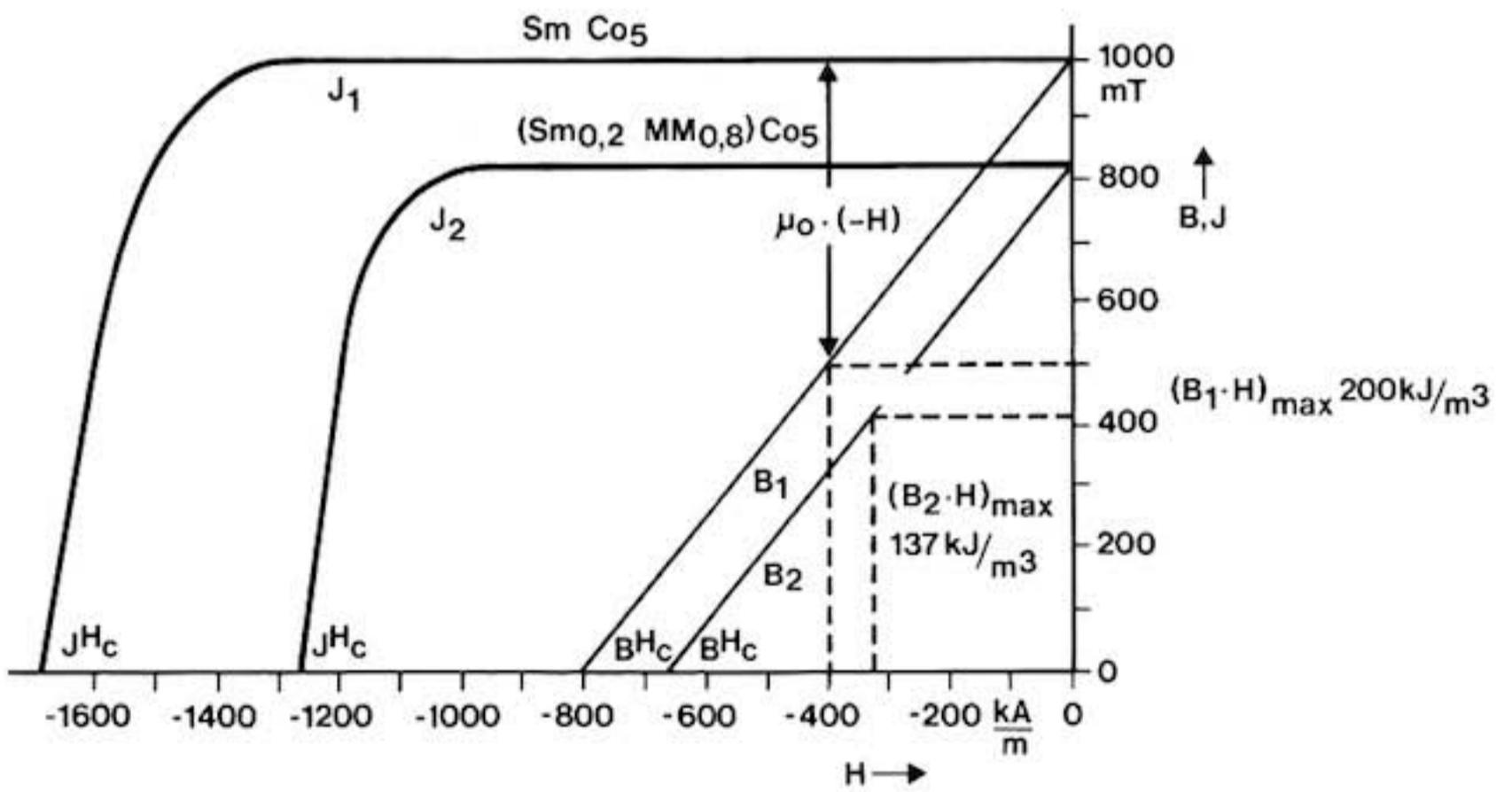
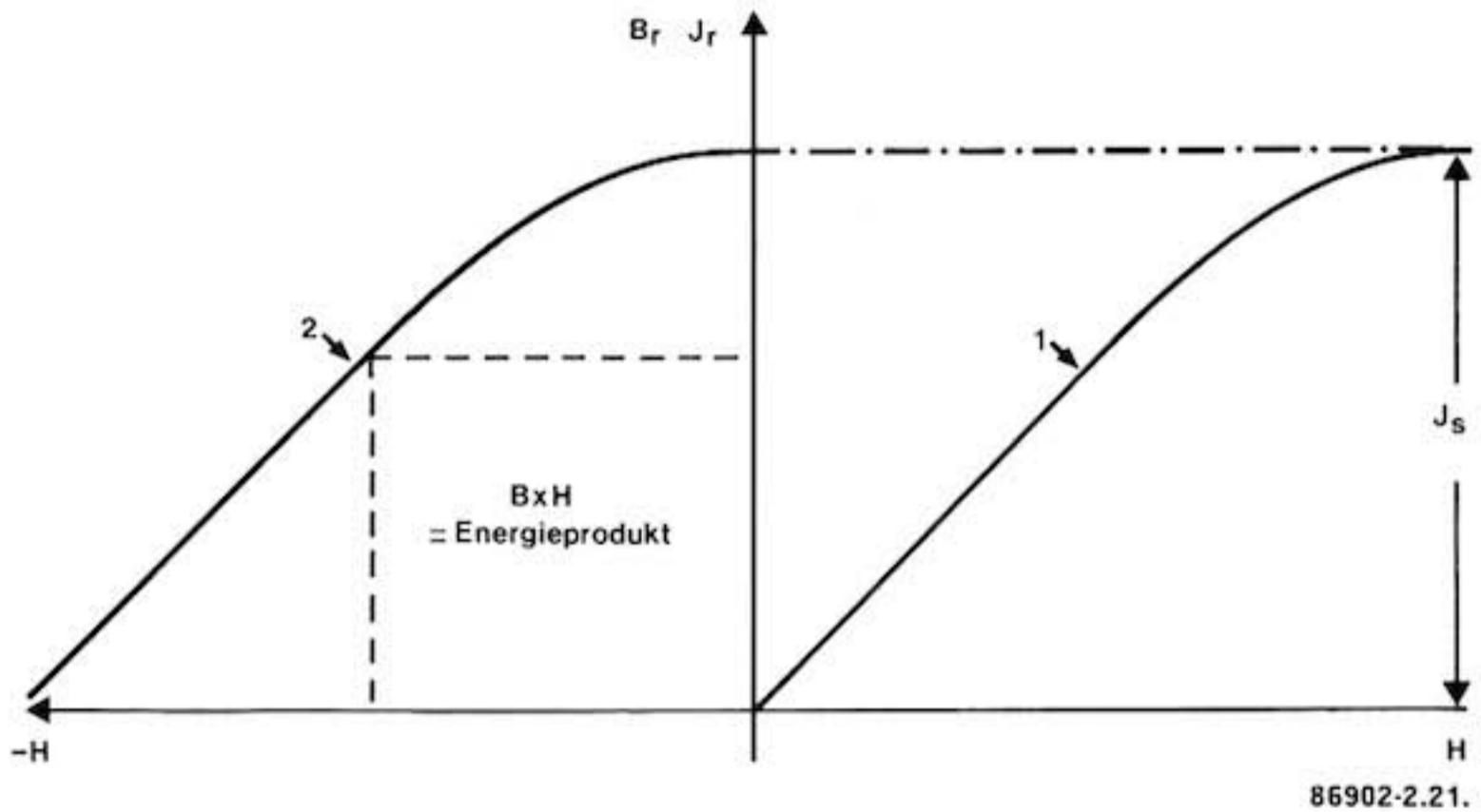
Jahr	Beimischung	$(BH)_{\max}$ Mega-Gaus Oerstedt	Magnet- gewicht	typisches Design
1932	6% CHROME	0.285	5 lbs.	
1932	9% COBALT	0.50	2 1/2 lbs.	
1934	ALNI Ring	1.25	14 ozs.	
1936	ALNICO Ring	1.7	11 ozs.	
1944	ALCOMAX I Ring	3.8	5 ozs.	
1944	ALCOMAX I Plug	3.8	4 ozs.	
1948	ALCOMAX II Plug	4.3	3 1/2 ozs.	
1953	ALCOMAX III Plug Random Crystals	5.0	2 1/2 ozs.	
1958	ALCOMAX III Plug Semi- Columnar Crystals	5.75	2 1/2 ozs.	

86902 - 2 - 20a

Bild 2.20a.

verstärken und abschwächen, denn die Polplatte und der Polkern leiten dieses Magnetfeld ebenso wie das des Magneten. Hier werden sogar dann deutliche Verzerrungen produziert, wenn sich die Schwingspule (und Membran) fast nicht bewegen; also beim Ein-

bau in Baßhörner oder im Mitteltonbereich! Ein Ausweg wäre, die Polplatte und den Polkern in der magnetischen Sättigung zu betreiben, was bei Eisen bei ca. 1,5 Tesla der Fall ist. Der magnetische Fluß kann sich in den Eisenteilen dann nicht mehr nennenswert ändern. Mit Ferrit-Magneten, deren Flußdichte im Magnetmaterial auf etwa 1,0 Tesla begrenzt ist, bringt das allerdings einige Schwierigkei-



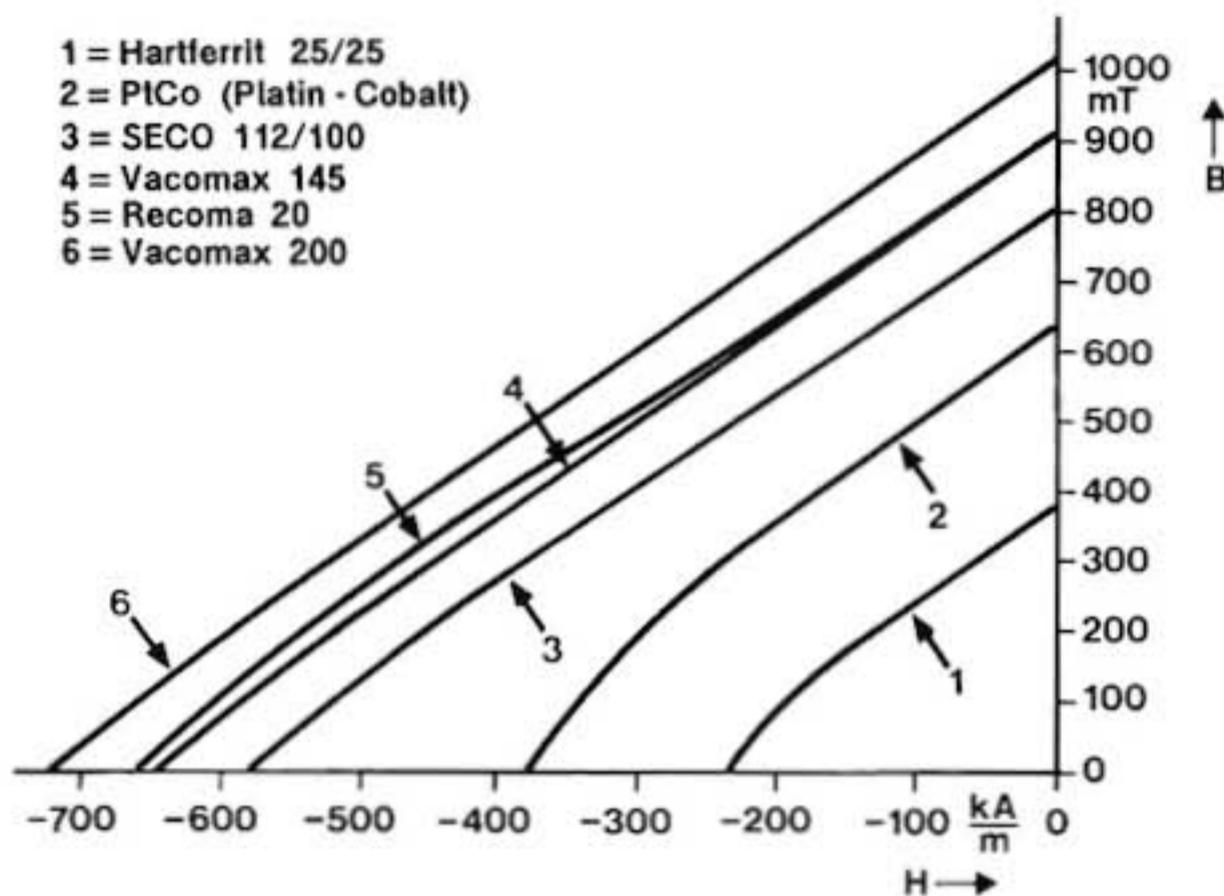


Bild 2.21. Die Entstehung eines Magneten. Der Magnetwerkstoff wird mit der Feldstärke H polarisiert, bis im Punkt J_s keine weitere Steigerung der magnetischen Induktion mehr erfolgt (Kurve 1). Wird jetzt H wieder reduziert, so folgt der Zusammenhang zwischen B und H einer Kurve, die nicht mehr durch Null geht, sondern für $H = 0$ einen bestimmten Wert B_r aufweist (Kurve 2). Das ist die sogenannte Remanenzflußdichte. (Erst bei gegenseitiger Magnetisierung nimmt B_r wieder ab.) Das Energieprodukt des Magnetmaterials entspricht der Fläche des größten Rechtecks, das unter dieser Entmagnetisierungskurve untergebracht werden kann.

Bild 2.21b1. Entmagnetisierungskurven für verschiedene Magnetmaterialien.

Bild 2.21b2. Entmagnetisierungskurven für verschiedene Magnetmaterialien.

ten mit sich (in erster Linie durch den Rotstift der Kalkulationsabteilung bedingt). Früher bekamen die Konstrukteure diesen Effekt mit den Alnico-Magneten und deren hoher Flußdichte praktisch frei Haus geliefert. Es gibt also schon Gründe, die für die Alnico-Chassis sprechen. Ein Alnico-Magnet sollte dabei immer die cha-

rakteristische Topfform haben (Bild 2.22). Andernfalls ist es entweder kein Alnico, oder eine Fehlkonstruktion mit sehr hohen inneren Verlusten.

Ferrit-Magnete haben dagegen immer eine flache Bauform, ähnlich wie in Bild 2.23 dargestellt. Sie verursachen bei vielen neueren Chassis auch keine Probleme mit der Fluß-Modulation.

Ein kleiner Trick hilft den Herstellern hier weiter. Ein Kupferring oder eine Kupferkapsel wird am Polkern angebracht. Jeder Strom in der Schwingspule induziert in diesem Kupfer einen entgegengesetzten Strom, dessen Magnetfeld ebenfalls die entgegengesetzte Richtung hat. Damit wird das störende Magnetfeld der Spule aufgehoben.

Auf diese Weise lassen sich die Verzerrungen bis zu 20 dB herabsetzen; also bis auf 1/10. Besser klappt das mit Alnico auch nicht. (Gleichzeitig verringert der Kupferring auch den induktiven Widerstand der Spule, der ja auch eine Folge magnetischer Felder ist.) Nachteilig an dieser Methode ist die Tatsache, daß ein Kupferring bei falschen Abmessungen und/oder falscher Position zusätzliche Verzerrungen erzeugt. Dem Hersteller kostet der Spaß damit teure Versuche und Berechnungen, weshalb Sie erfolgreiche Eingriffe dieser Art nur bei teureren Chassis renommierter

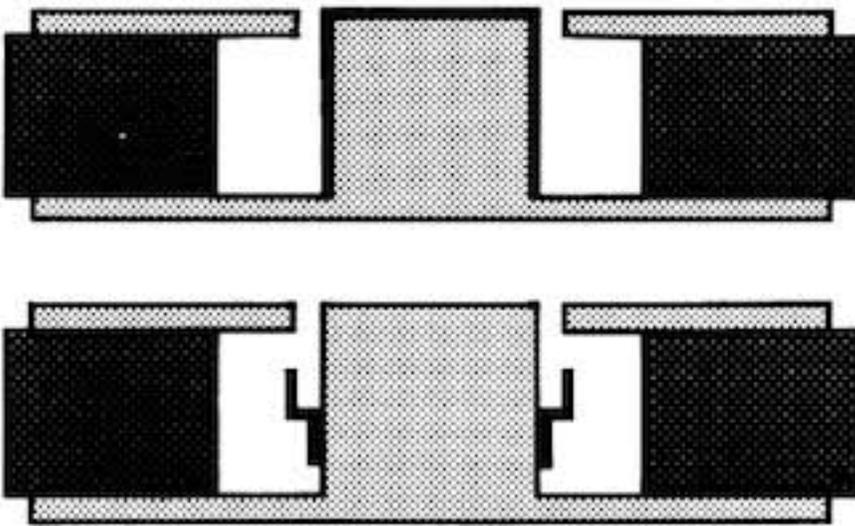
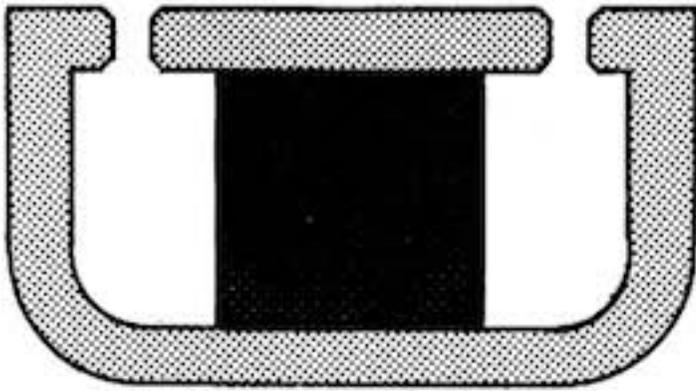


Bild 2.22. Alnico-Magnete unterscheiden sich in der Bauform von den Ferrit-Magneten. Vergleichen Sie den gezeichneten Alnico-Magnet mit den Ferrit-Magneten in Bild 2.23.

Bild 2.23. Typische Ferrit-Magnete mit einer Kupferkapsel (oben) und mit einem Kupferferring (unten) zur Verringerung der Flußmodulation.

Hersteller finden.

Das wichtigste Bauteil bei jedem Lautsprecherchassis (soweit es überhaupt möglich ist, einzelne Teile isoliert zu bewerten) ist die Lautsprechermembran. Es gibt sie in den verschiedensten Formen und Größen und aus den unterschiedlichsten Materialien. Papier, diverse Kunststoffe, Stoffgewebe, Verbundwerkstoffe und selbst seltene (hochgiftige) Metalle wie Beryllium werden von den Herstellern eingesetzt. Jede Werbeabteilung verkauft ihr Membranmaterial als das beste überhaupt. Die Werbung ist so perfekt, daß der Verbraucher schließlich etwas verunsichert ist. (Selbst Fachzeitschriften haben schon Aluminium als Titan verkauft.) So werden Neuentwicklungen als das beste Prinzip überhaupt angeboten

(z.B. die Flachmembrantechnologie in sogenanntem Sandwichaufbau). Plötzlich findet man im nächsten Moment die neuen Flachmembranwunder zu Dumpingpreisen in der Auslage eines Elektronik-Großhändlers. Andersherum werden sehr gute Hifi-Boxen schon seit über zehn Jahren in fast unveränderter Bauform produziert. Da kann doch irgendwas nicht stimmen.

Weshalb ist das Thema Lautsprechermembran nun so viel wichtiger als andere Bauteile, die doch auch erhebliche Verzerrungen erzeugen können? Nun, betrachten Sie einmal die Arbeitsweise einer Membran. Einem Chassis wird ein Rauschsignal von 50 bis 700 Hz zugeführt. Was dabei herauskommt, ist in Bild 2.24 dargestellt.

Offensichtlich erzeugt die Membran noch Frequenzen, die im Eingangssignal nicht enthalten waren. Ein bereits von den unsymmetrischen Nichtlinearitäten k_2 und den symmetrischen Nichtlinearitäten k_3 (z.B. der Membranaufhängung bei größeren Auslenkungen) bekannter Ärger.

Nur, k_2 und k_3 sind sogenannte harmonische Verzerrungen, da sie Oberwellen, also ein Vielfaches der Frequenz des Grundtones sind. Die mit Vorliebe von einer Lautsprechermembran abstrahlten Frequenzen, die Membranresonanzen, stehen dagegen fast nie in irgendeinem harmonischen Verhältnis zueinander. Deshalb haben sie noch sehr viel weniger mit Musik zu tun, als die bereits bekannten harmonischen Verzerrungen!

Weiterhin sind sie sehr oft außerhalb des Einsatzbereiches der jeweiligen Chassis zu finden, womit sich Tieftonchassis im Mitteltonbereich und Mitteltonchassis im Tief- und Hochtonbereich störend bemerkbar machen. Die Anregung der Resonanzen erfolgt dabei über Summen- und Differenzsignale der Frequenzen im Einsatzbereich. So können z.B. 450 Hz und 500 Hz eine 950-Hz-Resonanz eines Tieftonchassis ebenso anregen wie 350 Hz und 600 Hz im Eingangssignal. Da es sich dabei um eine Membranresonanz handelt, wird diese Frequenz von der Membran immer abgestrahlt! Dagegen können sich die Verzerrungen z.B. des Antriebes bei hohen Frequenzen nicht gegen die Massenträgheit der Membran eines Mitteltonchassis durchsetzen. Die Massenträgheit bremst die Bewegung des ganzen schwingenden Systems, damit auch die der Verzerrungen. Die folgende Tabelle gibt einen

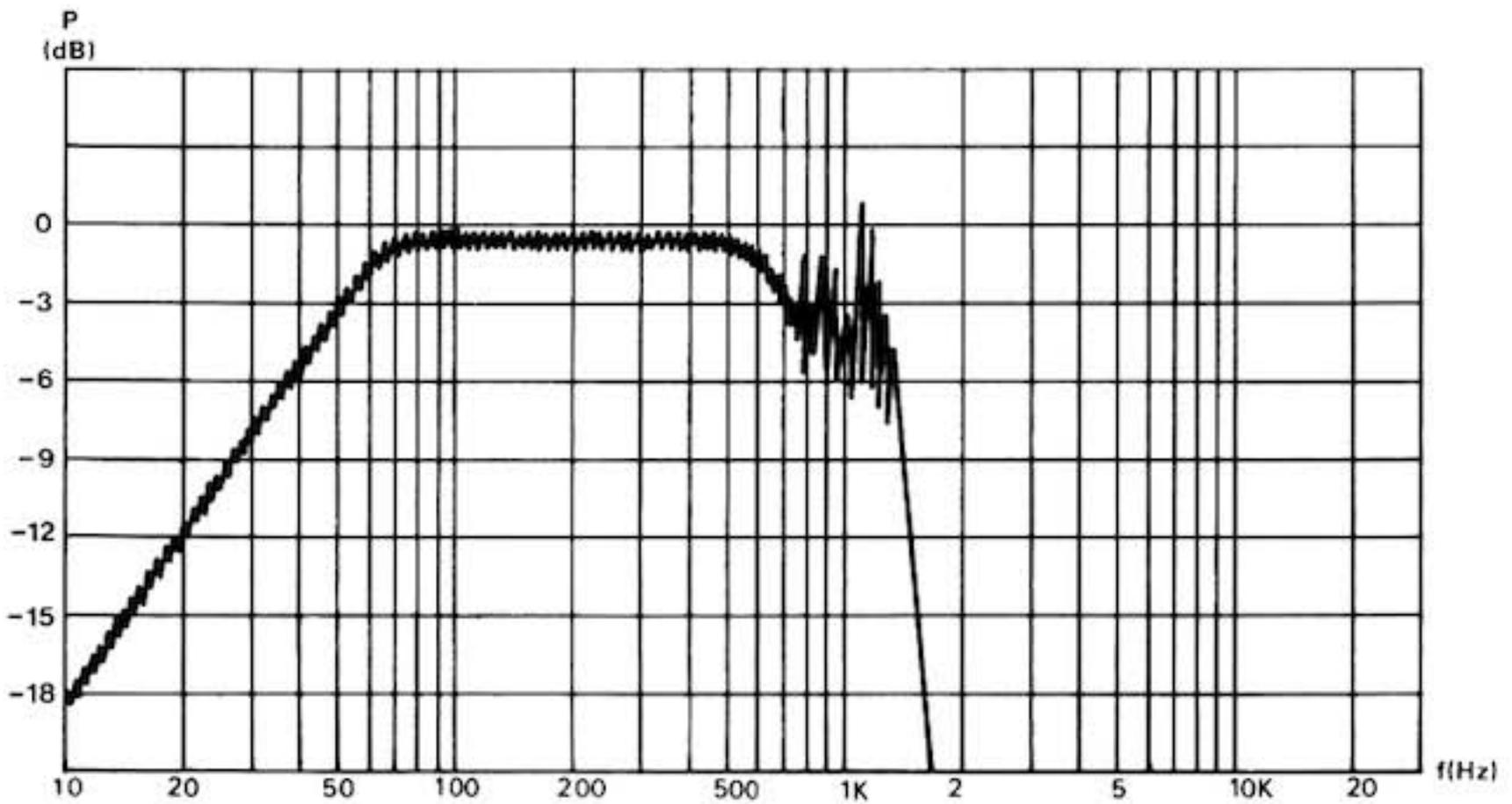


Bild 2.24. Obwohl das Eingangssignal nur Frequenzen unter 700 Hz enthält, produziert das Chassis auch noch deutlich höhere Frequenzen.

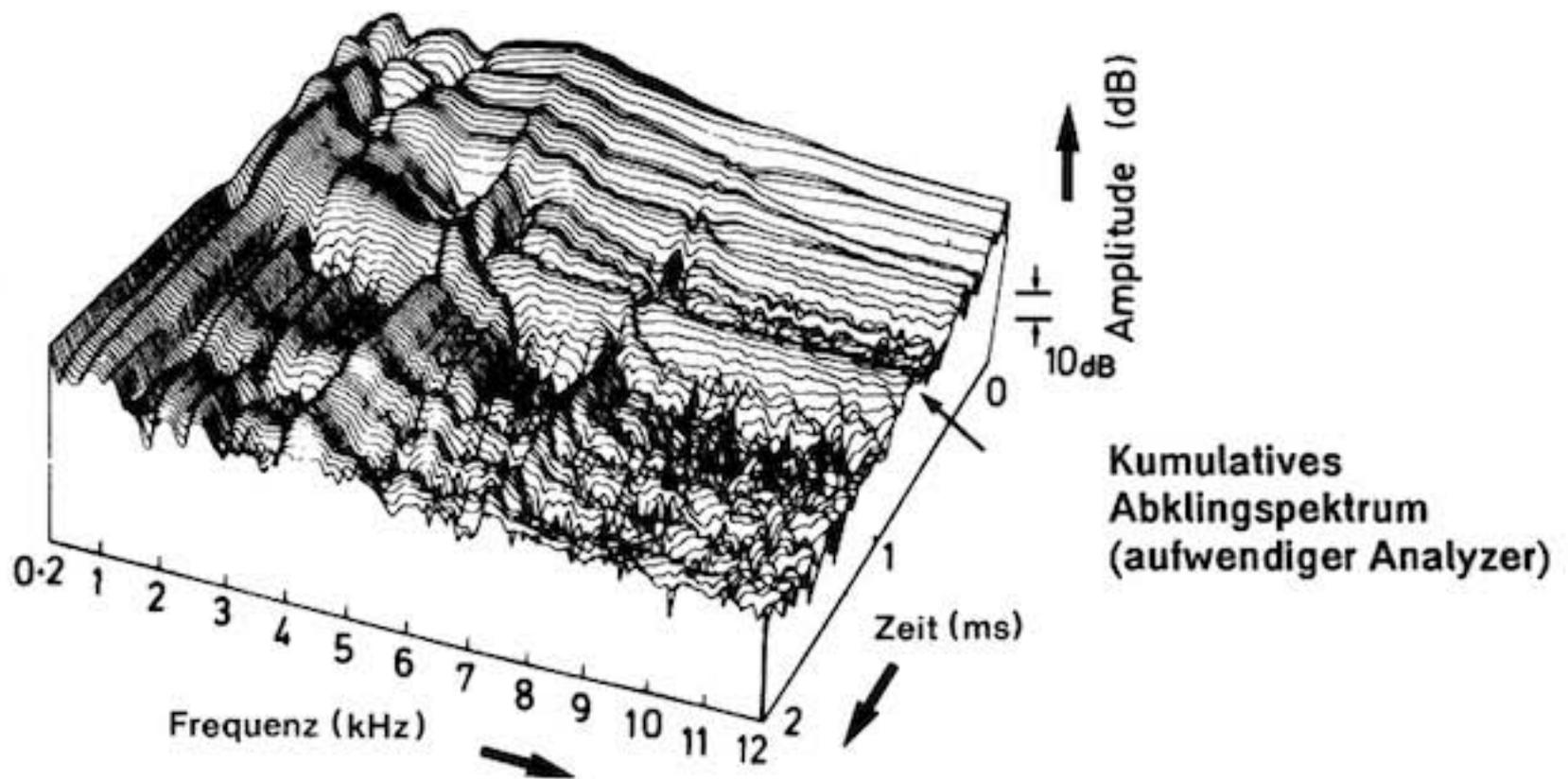
Überblick über die Resonanzfrequenzen einer durchschnittlichen Lautsprechermembran. Die einzelnen Frequenzen sind, ebenso wie die Resonanzüberhöhung dieser Frequenzen, eine Folge von Größe, Material, Form der Membran und Membranaufhängung. Das ist eine höchst komplexe Angelegenheit bei der Entwicklung von Lautsprecherchassis. Hier liegt auch der

Grund dafür, daß alle verschiedenen Lautsprecherchassis unterschiedlich klingen (manche regelrecht schlimm). Selbst zwei gleiche Chassis eines Herstellers weisen oft noch Klangunterschiede auf. Die Membranresonanzen nimmt das Gehör als leicht verfälschte Klangfarbe (verfärbte, engl. coloured Sound) wahr. Mit konventionellen Meßgeräten sind diese Resonanzen nur sehr schwer nachzuweisen. So ist eine Resonanz selbst dann hörbar, wenn ihr Lautstärkepegel um 40 dB unter dem mittleren Schallpegel liegt, obwohl der meßbare Einfluß auf den mittleren Schallpegel nur etwa 0,1 dB beträgt.

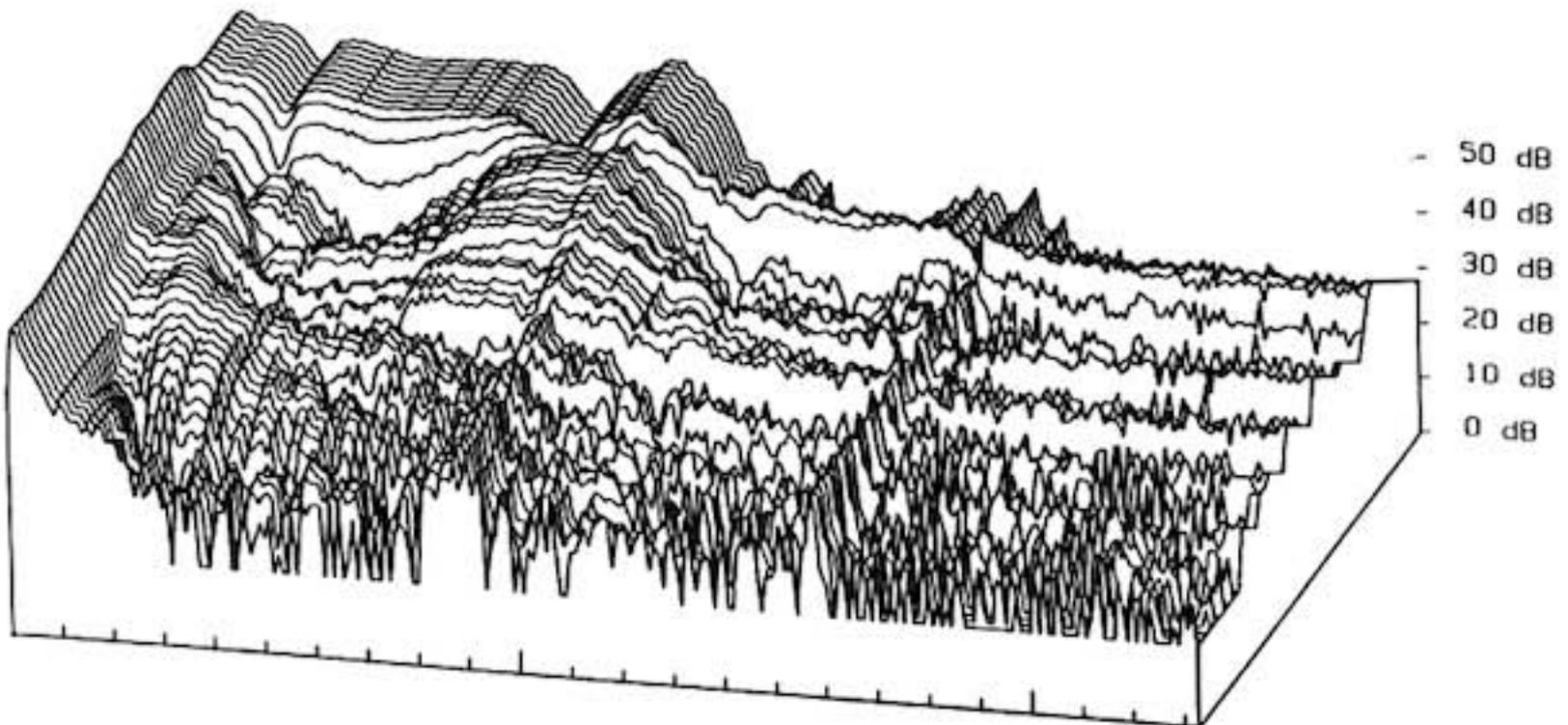
Diese Resonanzen sind selbst mit modernsten Digitalmeßgeräten schwer nachzuweisen. Bild 2.25a zeigt ein sogenanntes kumulatives Abklingenspektrum, das mittels einer Fourier-Transformation aus dem Ausschwingverhalten einer Lautsprecherbox erstellt wurde. Grobe Resonanzen sind am langsamen Ausschwingen gut zu erkennen, aber von den einzelnen dBs ist nichts zu sehen. Dabei ist die Grafik von einem der zur Zeit leistungsfähigsten Analyzer berechnet worden. Mit preiswerteren Meßgeräten, die weniger Linien und damit grobere Mittelwerte liefern, ist noch weniger zu erkennen. Hier hilft wirklich nur das Gehör; bewerten Sie daher die Aussagen all derer, die immer nur mit Meßwerten anrücken, wie gewohnt skeptisch.

Tabelle

16 cm Papiermembran, konisch (Hz)	16 cm Papiermembran, Navi (Hz)	17 cm Alukalotte (Hz)
16	32	49
27	97	1320
49	198	1996
87	367	2375
132	584	3017
739	667	3903
905	702	8538
1008	748	8631
1223	921	8814
2348	1004	8971
2695	1413	
3018	1536	
9408	9585	



b



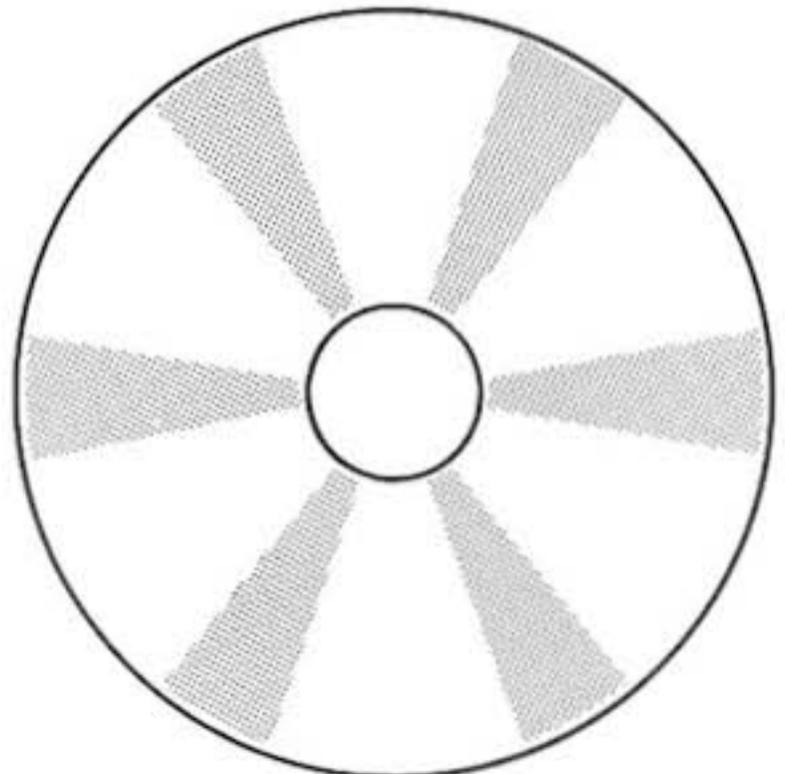
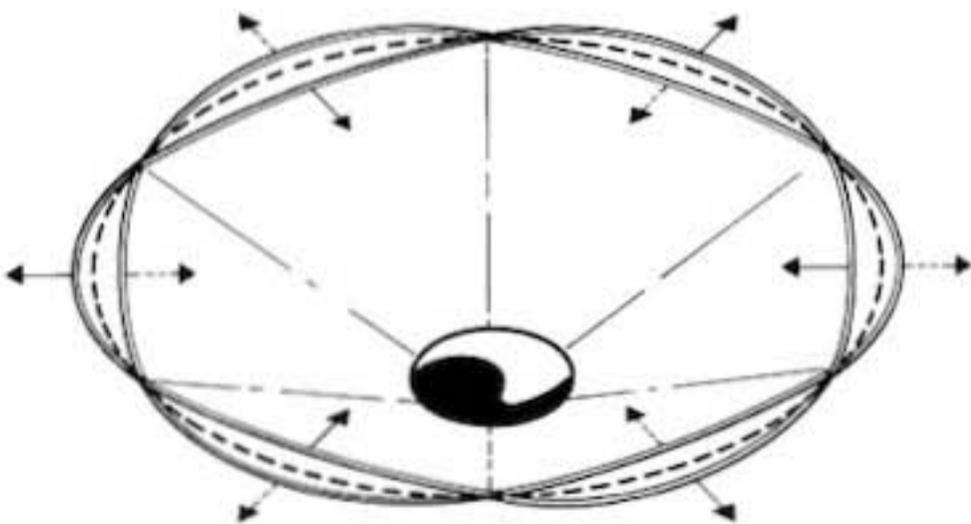
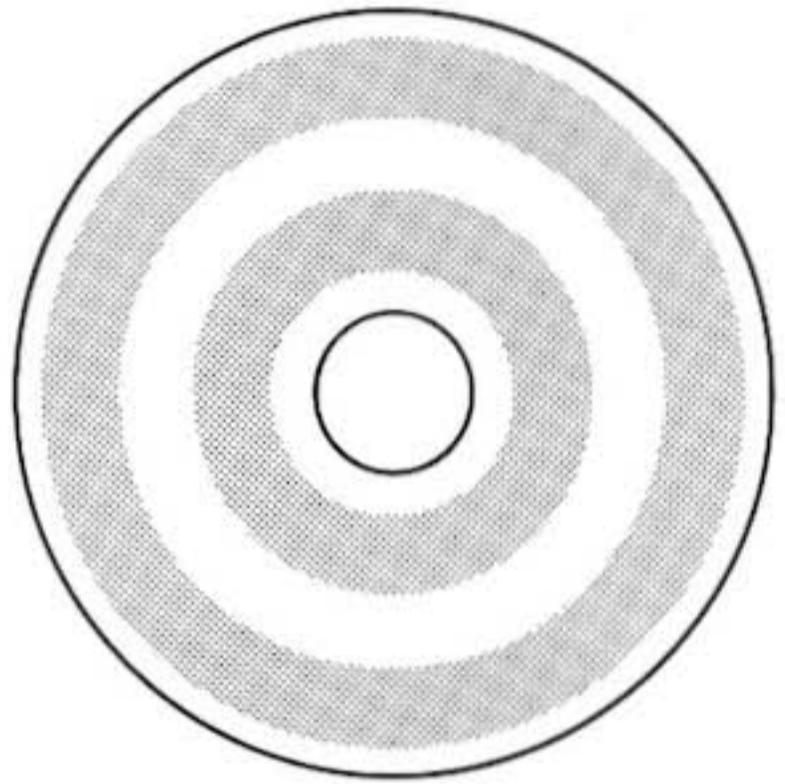
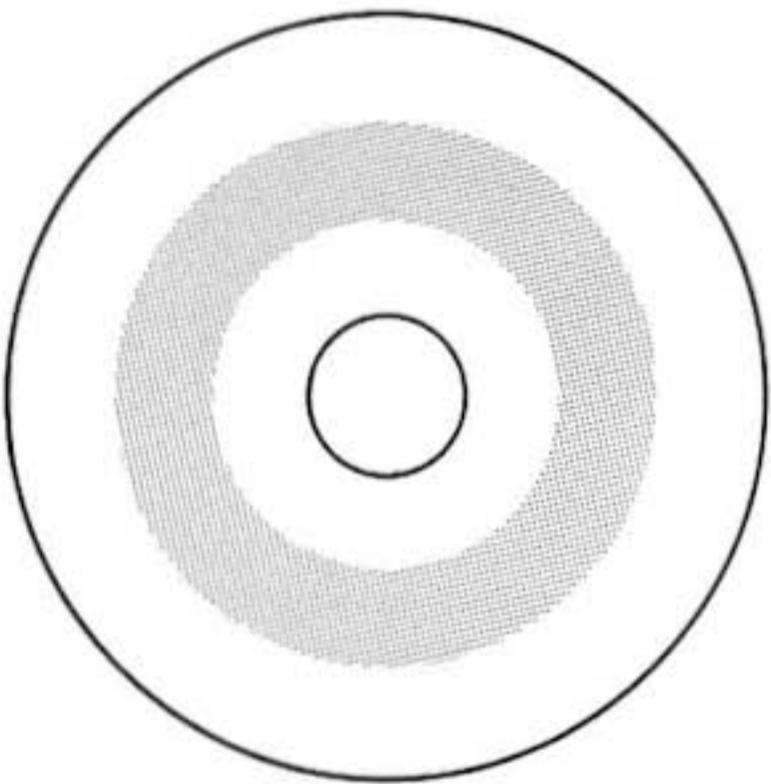
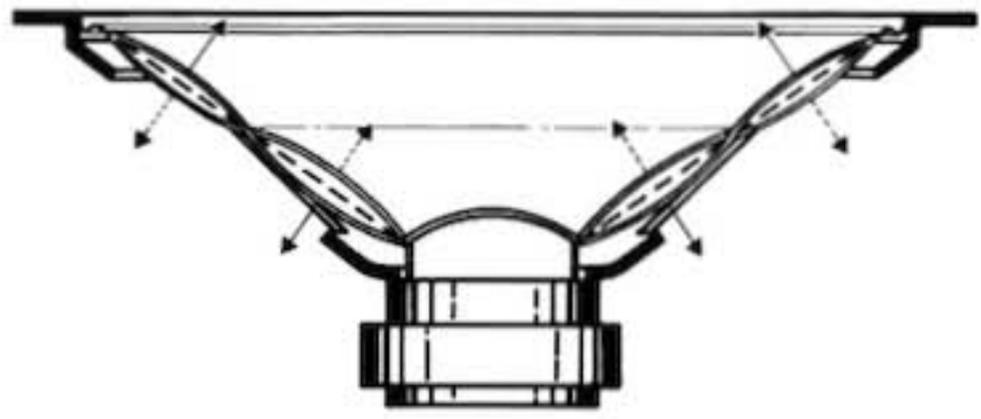
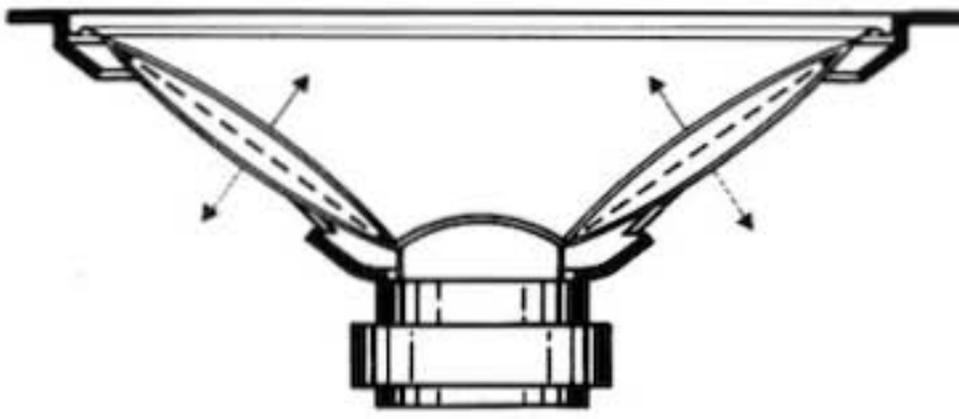
Kumulatives Abklingspektrum (Low - Cost - Analyser)

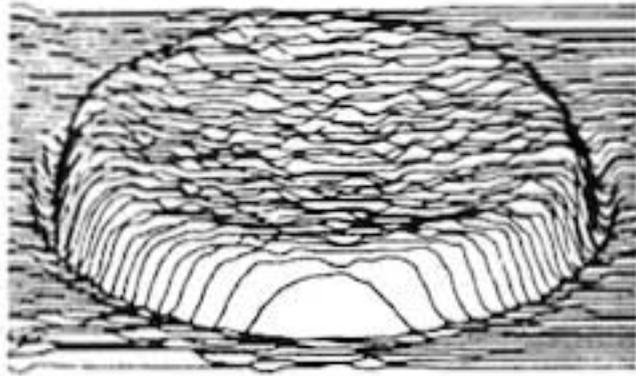
86902-2-25b

Bild 2.25. Das Cumulative Decay Spectrum, mit dem der Abklingvorgang einer Schwingung in Frequenz, Amplitude und Zeit darstellbar, zeigt auch Membranresonanzen. Sie benötigen extrem genaue Geräte (Bild a), wenn Sie hier nach Bruch-

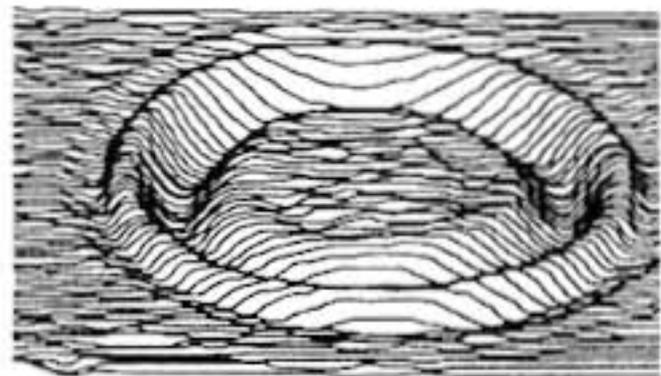
teilen von dBs suchen. Mit preiswerteren Geräten finden Sie wenig (Bild b).

Bild 2.26. Achsensymmetrische oder asymmetrische Resonanzen können einzeln oder zusammen auftreten.

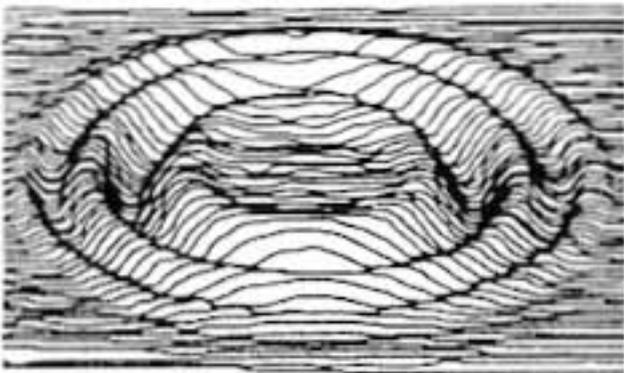




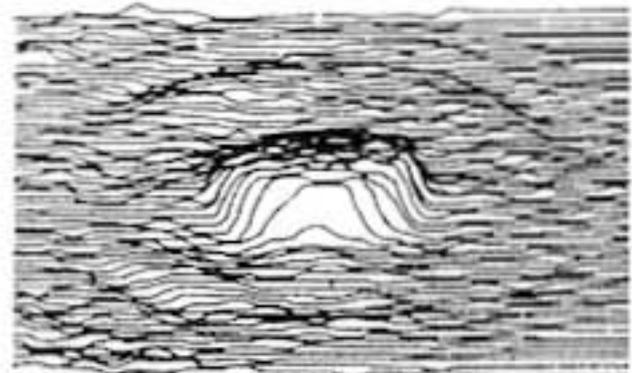
1



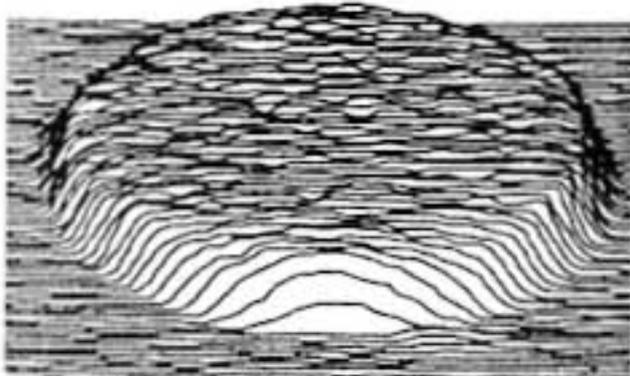
2



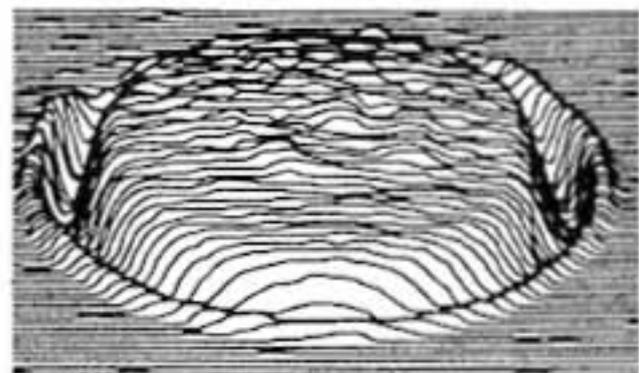
3



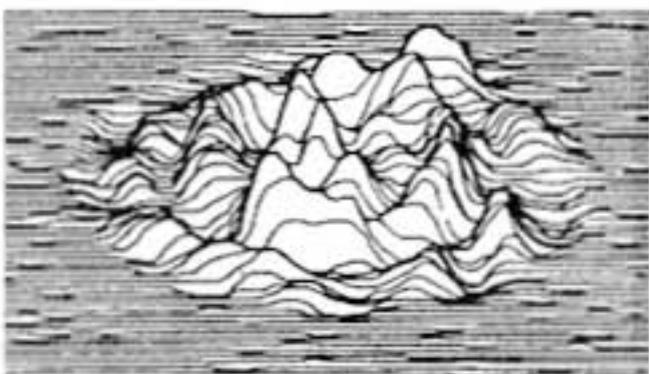
4



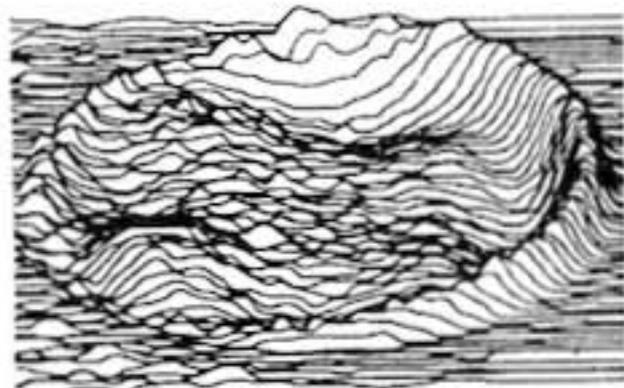
5



6



7



8

In Bild 2.26 sind die Membranresonanzen bildlich dargestellt. Es unterscheiden sich symmetrische und asymmetrische Membranresonanzen.

In beiden Fällen zerbricht die Membran in Teilschwingungen, wobei sich Teile der Membran gegenphasig zu anderen Teilen bewegen. Neuere Techniken wie die Laser-Interferenz-Holographie zeigen das noch deutlicher (Bild 2.27).

Die Bilder 2.26 und 2.27 machen auch deutlich, daß die Membran eines Lautsprecherchassis im Grunde nie allein betrachtet werden darf. Die Sicke ist nicht nur zur Zentrierung erforderlich, sie kann auch als dämpfendes Element einige Resonanzen der Membran bedämpfen (oder als resonantes Element weiteren Ärger verursachen).

Bedämpfung ist seit sehr vielen Jahren das Stichwort für alle Chassiskonstruktoren. Das aus sehr gutem Grund. Jeder Werkstoff besitzt ein bestimmtes Raumgewicht und eine ebenso bestimmte Federsteife (E-Modul). Das hat die unangenehme Folge, daß sich mit einem einzigen Werkstoff keine resonanzfreien Membranen herstellen lassen. Erst mit einem Gemisch aus verschiedenen Materialien entsteht eine Membran mit gewünschter Festigkeit und richtiger innerer Dämpfung. Die Chassishersteller hatten das natürlich schon sehr früh herausgefunden und waren schnell

Bild 2.27. Die Laser-Holografie, die von der Firma Celestion perfektioniert wurde, ist das beste Werkzeug zur Feststellung von Membranresonanzen (bzw. Resonanzen der Membranaufhängung).

Bei den Bildern 1, 2 und 3 verringert sich die effektive Fläche des TT-Chassis SL 6 (Celestion) zu hohen Frequenzen und gewährleistet so eine ausgewogene Abstrahlcharakteristik. (Die Bilder gelten für Frequenzen von 900, 3000 und 4000 Hz.)

Weniger gut sind die Eigenschaften für die Chassis der Bilder 4, 7 und 8. Bei 4 schwingt eine schlecht befestigte Staub-schutzkappe unkontrolliert mit. Bei 7 (Hochtonchassis, $f = 19$ kHz) und 8 schwingt so ziemlich alles unkontrolliert. Die Fläche für ein optimales Hochtonchassis ist in 5 zu sehen.

Erst bei 20,4 kHz (6) bricht die Membran auf.

mit dem geeigneten Gemisch zur Hand: Pappe. Genauer gesagt waren es verschiedene Pappsorten. Weiches Gemisch mit niedriger Schallgeschwindigkeit war für Tieftonchassis geeignet und härteres Material für Mittel- und Hochtonchassis. Die Zahl der Patente und Geheimrezepte für die verschiedenen Zusammensetzungen geht in die Hunderte. Die gegenseitige Abhängigkeit von Form, Material und Resonanzen ist so komplex, daß eine Berechnung fast unmöglich war.

Wird das Material geändert, um die Resonanzen einer Bauform besser zu bedämpfen, so ändert sich erst einmal das Abstrahlverhalten der Membran durch die geänderte Schallgeschwindigkeit im Membranmaterial (Bild 2.28).

Wird jetzt die Form geändert, um das Abstrahlverhalten in den Griff zu bekommen, so ändert sich die Lage der Resonanzen und damit die Wirkung der Bedämpfung, usw. usw. Jeder neue Versuch macht eine neue und teure Preßform notwendig. Das hat manchen Hersteller dazu veranlaßt, weit vor dem gesteckten Ziel auszusteigen. Das Ergebnis waren weniger gute Chassis. Andere Hersteller haben weiter geforscht und entwickelt. So sind noch heute die am besten verfügbaren Lautsprecherchassis überwiegend noch mit den guten alten Pappmembranen aufgebaut. Es besteht kein Grund, solche Konstruktionen als Oldtimer zu belächeln, auch wenn manche Werbesprüche das immer wieder so hinstellen. Das Interesse der Hersteller an neuen Werkstoffen hat einen anderen Grund.

Es sind natürlich bei der Produktion der Pappmembranen mal öfter Pannen passiert. Eine kleine Änderung der Zusammensetzung und das Chassis klingt völlig anders. Falls einige wichtige Zutaten gar ganz fehlen, klingt überhaupt nichts mehr. In einer Großserienproduktion sind das unhaltbare Zustände. Ebenso in der professionellen Technik, in der alles auch nach Jahren noch durch exakt gleiche Ersatzteile austauschbar sein soll.

Der wichtigste Schritt zur Verbesserung der Lage war die Überlegung, das Element Dämpfung getrennt vom Membranmaterial in die Rechnung zu bringen. Mit Hilfe der verschiedensten Beschichtungen wurde versucht, immer die richtige Bedämpfung für eine gegebene Membran zu finden. Die bekannteste Lösung unter der Bezeichnung Bextrene-Membranen ist sicherlich vielen Hifi-Fans be-

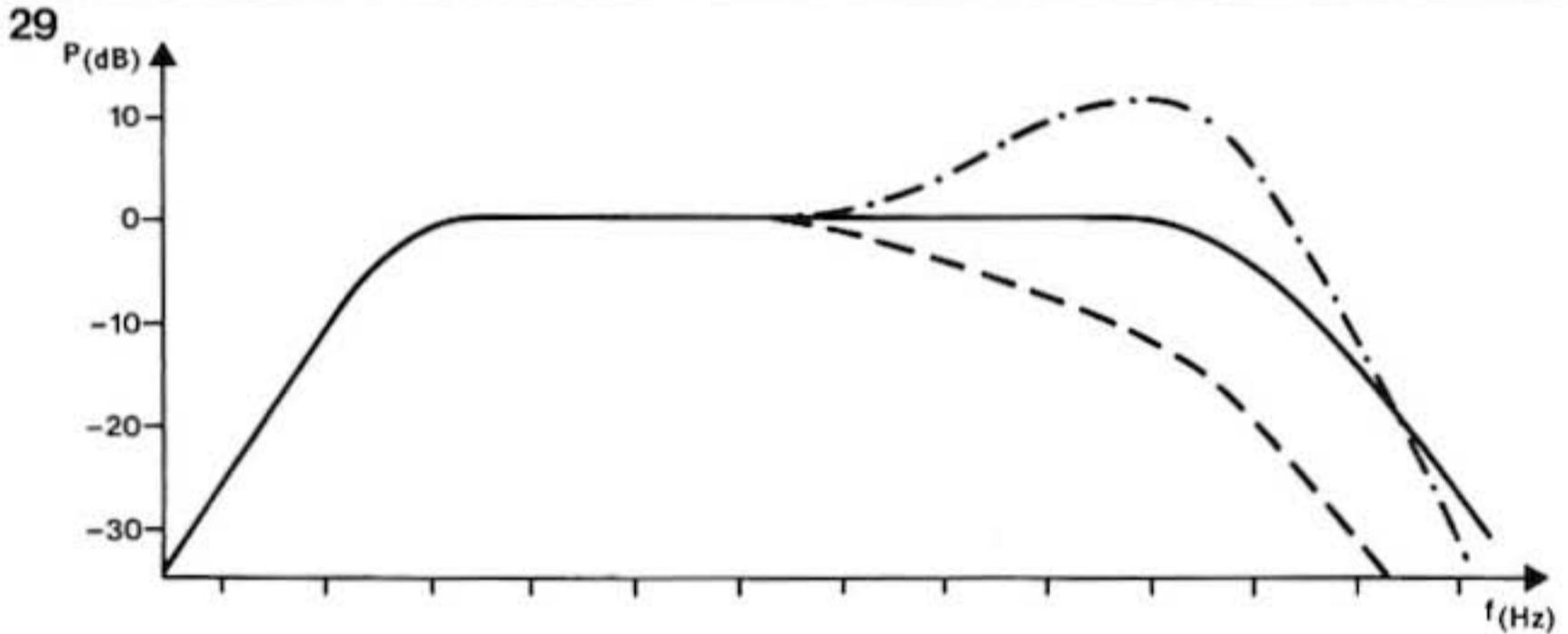
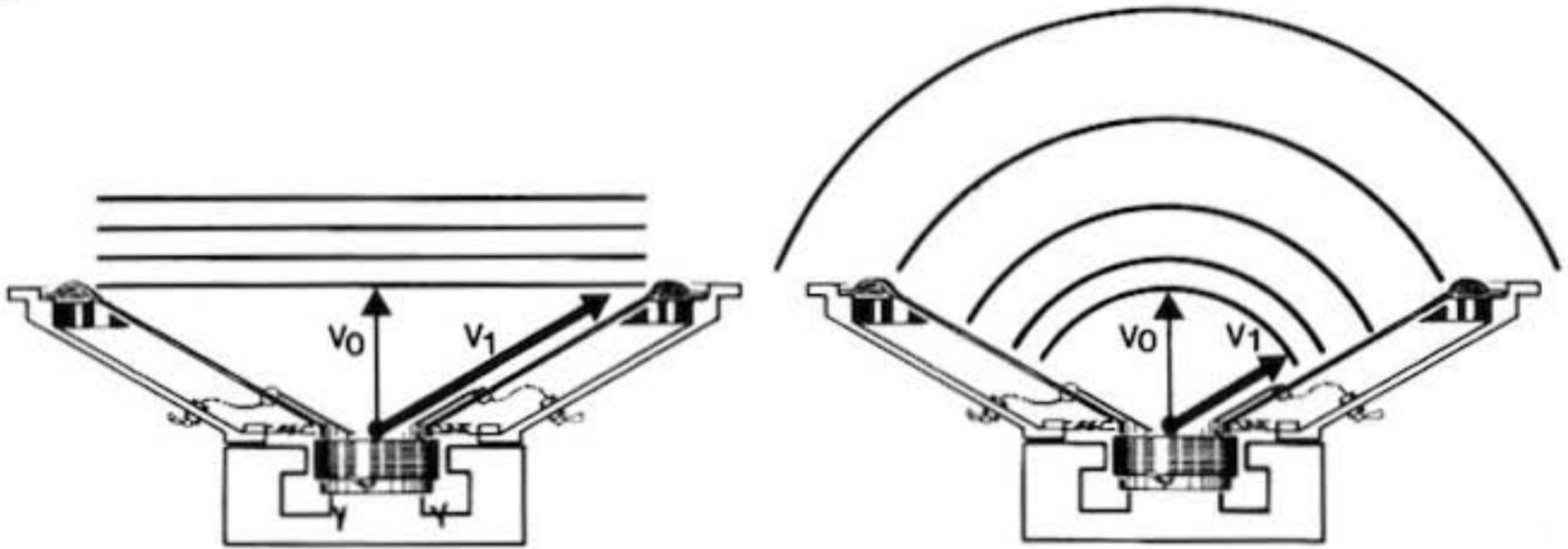


Bild 2.28. Die Schallgeschwindigkeit im Membranmaterial bestimmt das Abstrahlverhalten der Membran ebenso wie die Form. Die Schallgeschwindigkeit in der Luft ist V_0 und die in der Membran ist V_1 .

Bild 2.29. Unterschiede in der Schalldruckwiedergabe auf Achse und seitlich. Die durchgezogene Kurve entspricht dem rechten Chassis aus Bild 2.28 für 0 und 30

Grad. Die strichpunktiierte Linie gilt für das linke Chassis (2.28) bei 0 Grad (auf Achse).

Bei 30 Grad gilt für das linke Chassis die gestrichelte Linie.

Bild 2.30. Die Festigkeit eines Eisenrohres ist bei geringerem Gewicht größer als die eines Vollmaterialstabes.

kannt. Das Ergebnis war trotzdem nicht völlig überzeugend. Die Dimensionierung der Membranen wurde einfacher. Resonanzen ließen sich recht gut bedämpfen, aber die Fertigungsprobleme und Serienstreuungen wurden durch die Beschichtung eher größer. Daneben zeigte sich, daß zuviel tote Masse einen höchst negativen Einfluß auf die Impulswiedergabe eines Lautsprecherchassis haben kann. (Es war der wichtigste Schritt, weil es unter Hifi-Aspekten der aufschlußreichste Schritt war, nicht der erfolgreichste.)

Die Problematik in Bild 2.30 kennen Sie bestimmt. Ein Eisenrohr biegt sich sehr viel weniger durch, als ein gleich dicker Stab aus Vollmaterial.

Das Material im Inneren des Stabes trägt nichts zur Festigkeit bei (Zug- und Druckkräfte im Innern sind gering), aber viel zum Gewicht, das die Durchbiegung verursacht.

Ebenso ist es bei schwer beschichteten Lautsprechermembranen. Die hohe Masse und geringe Festigkeit verursachen unter Impulsbelastung eine Walkarbeit der Membran (Bild 2.31).

Die eingespeiste Energie wird dabei erst mit einer unkontrollierten zeitlichen Verzögerung in Schallenergie umgesetzt (was mit Verlaub gesagt) zu einer grauenhaft schlappen Wiedergabe, vor allem im Baßbereich, führen kann. Das ist bei allen Vorteilen der Resonanzfreiheit nun auch nicht jedermanns Geschmack.

Für Experten: Wer wissen möchte, welche Anforderungen an die Festigkeit einer solchen Membran gestellt werden, kann sich die Beschleunigung nach folgender Formel ausrechnen:

$$a = \frac{4\pi \cdot X}{T^2}$$

Es ist:

a die maximale Beschleunigung (m/s²);

X die Auslenkung (m) und

T die Periodendauer (s).

Ferner ist noch die Erdbeschleunigung g (9,807 m/s²) interessant. Nach diesen Zusammenhängen wird eine 30-cm-Membran bei dem Versuch 1 akustisches Watt mit 60 Hz abzustrahlen, der 92-fachen Erdbeschleunigung ausgesetzt (d.h. die Membran ist 92-fach schwerer als in der Ruhelage). Bei einer höhe-

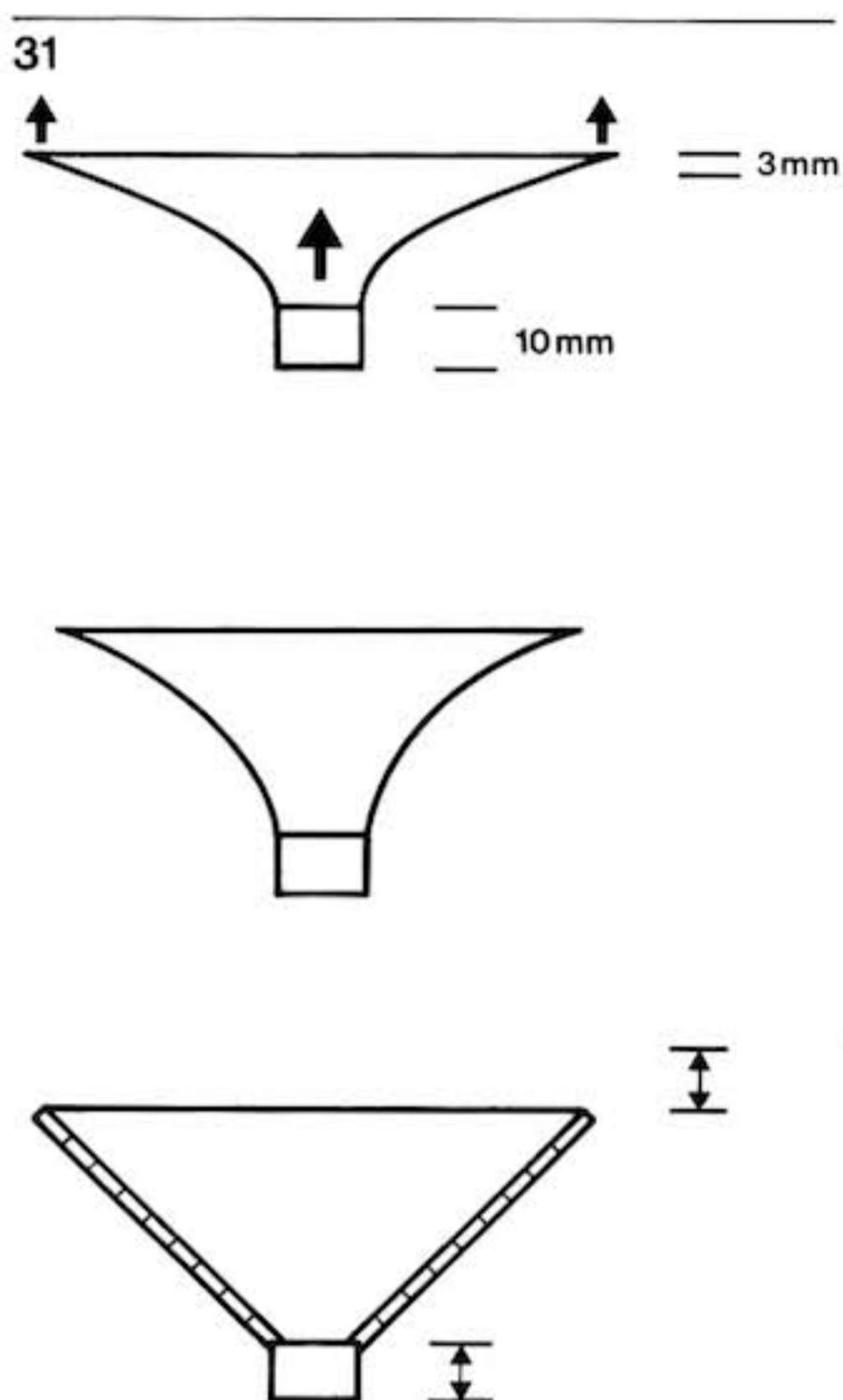
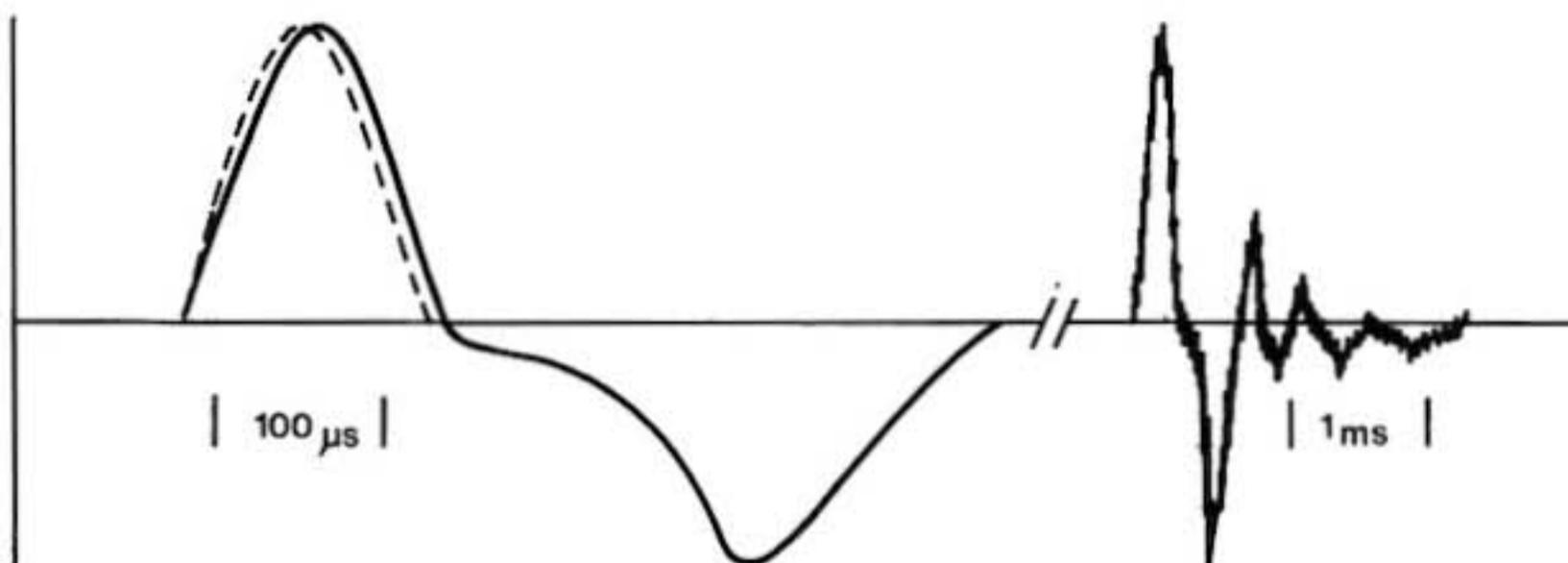


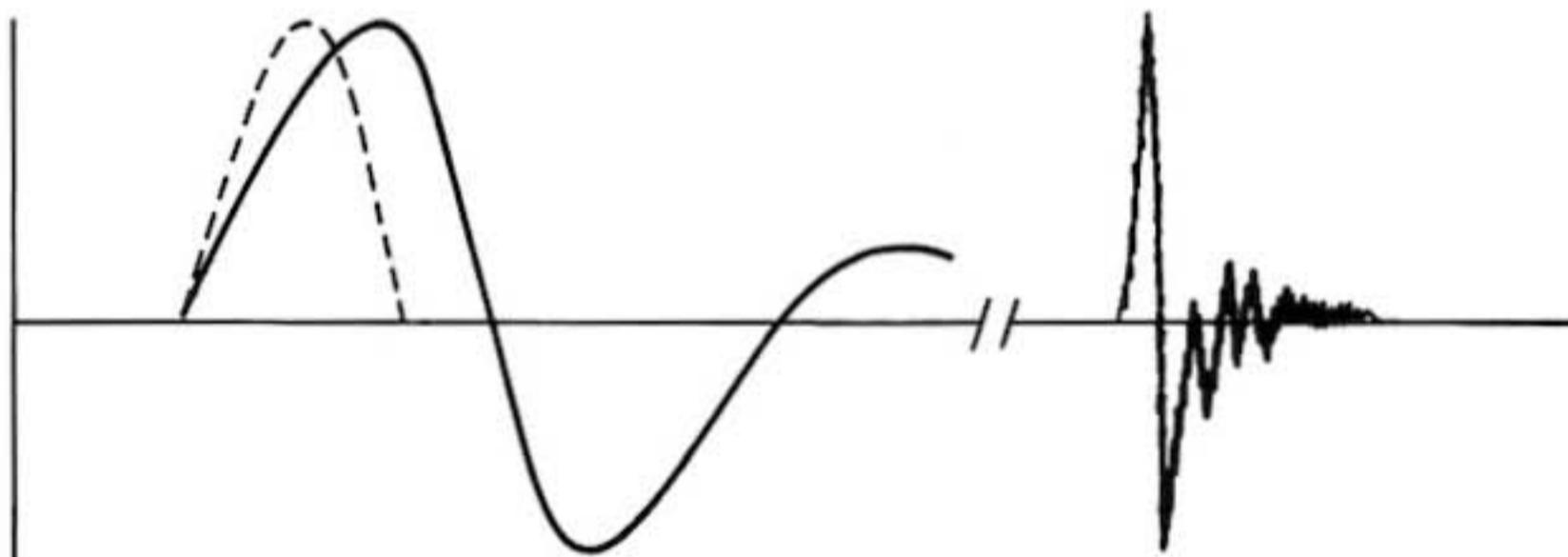
Bild 2.31. Bei einer beschichteten Papiermembran kann es durch die hohe Masse und der geringen Festigkeit zu Verformungen unter Impulsbelastung kommen. Eine Sandwich-Membran vermeidet das durch hohe Festigkeit bei geringer Masse. In den Kurven ist das Testsignal, eine quadrierte Sinus-Halbwellen, gestrichelt gezeichnet.

ren Frequenz von 10000 Hz sind es dann ca. 2000 g (g = Erdbeschleunigung), obwohl die große Membran jetzt nur noch 0,000005 m Auslenkung macht. Bei einer kleineren Membran ist es noch deutlich mehr. Was hier wirksam wird, ist die Massenträgheit des Membranmaterials. In ihr geht der größte Teil der Leistung, die der Verstärker an die Lautsprecherboxen liefert, verloren. Es gibt

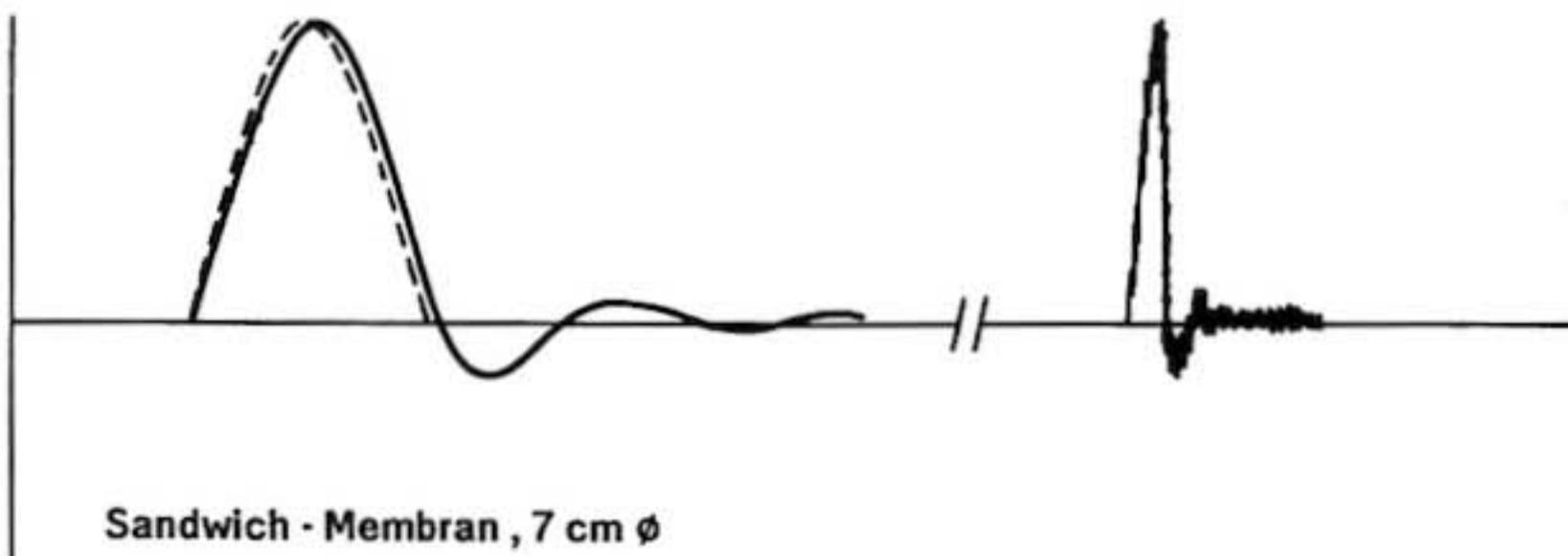
31 (Fortsetzung)



kleine Papiermembran , 4,5 cm ϕ



Navi - Membran , 20 cm ϕ



Sandwich - Membran , 7 cm ϕ

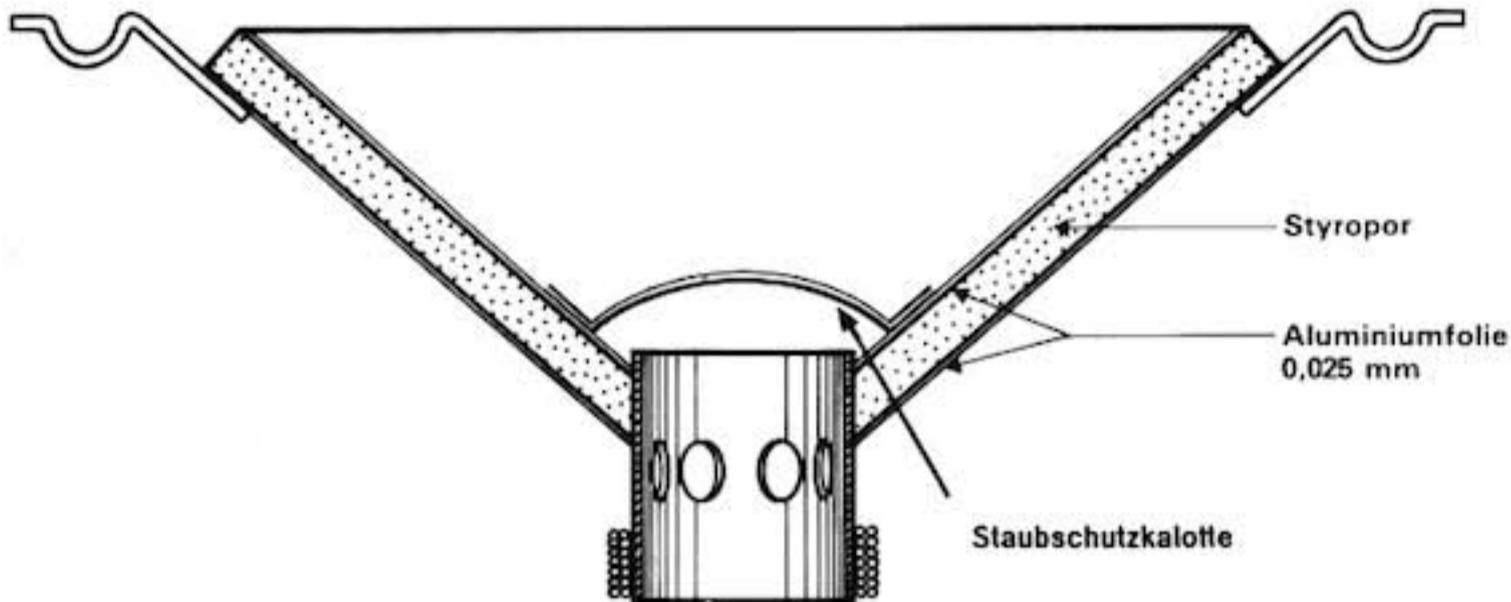


Bild 2.32. Der typische Aufbau einer Styropor-Membran.

auch noch andere Wege. Einer davon ist die Styropor-Membran, die auch heute noch ihren Platz unter den besten Hifi-Chassis hat. Allerdings nur im Baßbereich. Durch den inneren Aufbau des Styropors wird ein ähnlicher Effekt erzielt wie in dem Beispiel mit dem Eisenrohr. Beim Styropor-Chassis (Bild 2.32) stabilisieren dünne Metallfolien auf den Außenseiten das Material zusätzlich. Die Masse ist gering, die Festigkeit dagegen sehr hoch.

Das sehr gute Masse/Festigkeit-Verhältnis verringert die Verformung der Membran unter Impulsbelastung drastisch. (Kein Wunder, daß diesen Chassis ein sehr gutes dynamisches Verhalten nachgesagt wird.)

Nachteilig ist die geringe innere Dämpfung dieses Aufbaus; bei höheren Frequenzen ist es daher außerordentlich resonant. Das in Bild 2.38d abgebildete Chassis sollte z.B. nicht über 400 Hz und nur mit Frequenzweichen großer Filtersteilheit verwendet werden, da die erste Resonanz (engl. cone-breakup) bei etwa 800 Hz liegt. Ein Summenton aus 350 + 450 Hz = 800 Hz könnte hier, als Beispiel, für Ärger sorgen. In ihrem Einsatzbereich sind die Styropormembranen dagegen kaum zu schlagen. (Wenn Sie noch alte Baßchassis für Experimente übrig haben, dann probieren Sie doch einmal eine Beschichtung mit Styropor

aus.)

Noch ein anderer Weg: eine leichte Kunststoffmembran mit mittlerer Festigkeit, die mit einer geringen Bedämpfung auskommt. Hier liegen die Vorteile für die Hersteller auf der Hand. Durch gezielte Steuerung der Stoffeigenschaften sind die verschiedensten Membranen in immer gleichbleibender Qualität zu fertigen. Dem Namen nach kocht hier jeder Hersteller sein eigenes Süppchen: Polypropylen, Neoflex, Cobex, Polyolefin; so groß sind die Unterschiede jedoch nicht. Fast alle namhaften Hersteller arbeiten inzwischen mit diesen Kunststoffen. Sie finden viele klanglich hervorragende Chassis auch unter den preiswerteren Angeboten. Seien Sie aber skeptisch gegenüber weniger bekannten Marken, die häufig über Versandhändler angeboten werden. Es ist häufig so, daß sich Billigerhersteller an große Namen hängen, aber oft ohne die entsprechende Qualität zu liefern. Das Material alleine ist bei Lautsprechermembranen noch nicht viel wert. Schlecht klingende Kunststoffmembranen sind ebenso leicht zu fertigen wie schlecht klingende Papiermembranen.

Falls Sie mit der Mitteltonwiedergabe solcher Chassis unzufrieden sind, aber nicht gleich alles wegwerfen wollen, können Sie den gleichen Trick wie einige renommierte Chassishersteller probieren: eine Membranbeschichtung. Das geeignete Material wird in England unter der Bezeichnung Plastiflex P

1200 hergestellt. Die deutsche Bezeichnung ist Speaker Treatment. Es handelt sich dabei Polyvinylalkohol, eine mit Wasser verdünnbare Flüssigkeit, die bis zu einer bestimmten Viskosität aushärtet. Auf keinen Fall Holzleim (Ponal o.ä.) verwenden! Diesen Vorschlag hat zwar eine Elektronikzeitschrift gemacht, aber der Leim härtet, obwohl es fast die gleiche Substanz ist, völlig aus. Ein deutscher Hersteller von Polyvinylalkoholen ist die Firma Hoechst. Die Bezeichnung ist Mowiol; fragen Sie bei Interesse doch einmal dort an.

Bei vielen Chassis bringt die Beschichtung der Membran eine hörbare Klangverbesserung mit sich. Meßtechnisch ist der Erfolg jedoch kaum nachzuweisen; jedenfalls genau so schwer, wie die störenden Resonanzen selbst. Bei Tieftonchassis kann auch eine Beschichtung mit Wasserglas, einem beliebten Hilfsmittel bei der Papier- und Pappherstellung (Natronwasserglas Dichte 1,35 bis 1,41 g/cm³), Verbesserungen bringen. Es ist allerdings nicht ganz ohne Risiko, da Sie in den meisten Fällen die Zusammensetzung des Membranmaterials nicht kennen. Je nachdem, was der Hersteller bereits verwendet hat, könnte es wieder zu einer Verschlechterung der Membraneigenschaften führen. Beschichten Sie deshalb keinen teuren JBL-Baß noch zusätzlich mit Wasserglas, das hat die Firma bereits erledigt.

Ein weiterer Versuch, resonanzarme Membranen herzustellen, führt zu den Flachmembranen. Bei diesen Membranen ist die Festigkeit über die Form sehr gering, entsprechend hoch ist der Aufwand, der an der Membran selbst zu treiben ist. Antriebe mit bis zu vier Schwingspulen pro Membran und Membranstrukturen, die an den Flugzeugbau erinnern, weisen zwar recht passable Ergebnisse auf, aber das ist auch alles. Das Thema Flachmembran kann in Zukunft sicherlich interessant sein, aber dann nicht rund und auch nicht quadratisch geformt, sondern rechteckig. Auch sieht dann die Schwingspule etwas anders aus; lassen wir uns jedoch überraschen. Der wohl erfolgreichste Weg ist der Einsatz konventioneller Membranformen zusammen mit einem Membranmaterial, das gleichzeitig hohe Festigkeit und hohe innere Dämpfung aufweist. Dabei wird die Festigkeit aus der Struktur des Materials gewonnen, ähnlich wie bei Styropor; die Werte sind jedoch wesentlich besser. Die Dämpfung erzielt man durch Einlagerungen in das Material. Diese Idee ist nicht

gerade neu. Einige Patente dafür gibt es seit den fünfziger Jahren, aber zahlreiche Probleme und Kosten bei der Fertigung haben bisher erfolgreich jede Großserienproduktion verhindert. Die wenigen Chassis, die nach diesem Prinzip in Handarbeit entstanden, haben allerdings in der Hifi-Szene einen sehr guten Ruf. Das sehr gute Masse/Festigkeitsverhältnis macht die Impulswiedergabe dieser Chassis hervorragend, was bei Klangbewertungen häufig zu Aussagen wie lebendiges, frisches Klangbild oder extrem schnelle Wiedergabe führt (obwohl der Begriff schnell im Grunde nur bei Hochtonchassis von gewisser Bedeutung ist). Besonders aus Japan sind hierzu in naher Zukunft noch einige Überraschungen zu erwarten, denn in den Forschungsabteilungen ist dort zur Zeit einiges los.

Der große Nachteil all dieser Chassis ist der sehr hohe Preis. Damit lohnt der Einsatz nur in wirklich ausgereiften Kombinationen und in Aktivboxen. Hier gibt es nämlich einfachere Korrekturmöglichkeiten, wenn einmal eine Abstimmung nicht perfekt gelungen ist. Konzeptfehler können bei diesen Chassis teure Enttäuschungen verursachen, wobei besonders Sparsamkeit für Ärger sorgen kann.

Wollen Sie beispielsweise nur aus Sparsamkeit eine 2-Wege Box statt eine 3-Wege Version aufbauen, dann kann die Abstrahlcharakteristik dieser Chassis sehr leicht für unbefriedigende Ergebnisse sorgen. Die Chassishersteller arbeiten bei Papier- und Kunststoffmembranen oft mit einem kleinen Trick, um gut klingende 2-Wege Boxen zu produzieren. Sie setzen die geringe Festigkeit bestimmter Membranmaterialien gezielt ein. So schwingt die Membran nur bei tiefen Frequenzen im ganzen, während bei den höheren Frequenzen nur noch ein kleiner Teil in der Mitte Schallenergie abstrahlt. Es verändert sich so nicht nur der effektive Membrandurchmesser, sondern auch die Anpassungsfrequenz, oberhalb der eine Schallbündelung der Abstrahlung erfolgt. Über einen sehr weiten Frequenzbereich strahlt die Schallenergie gleichmäßig in den Abhörraum. Das heißt: Der Schalldruckverlauf ist auch bei höheren Frequenzen nicht nur auf der Hauptachse ausreichend linear, sondern auch zur Seite hin.

Bei den harten Sandwich-Membranen ist das anders. Hier beginnt die Bündelung bei der Frequenz, die sich aus dem Durchmesser der Membran errechnet. Es gilt:

$$f_a = \frac{10\,000}{r}$$

r = effektiver Membranradius in cm
 10000 = konstanter Wert

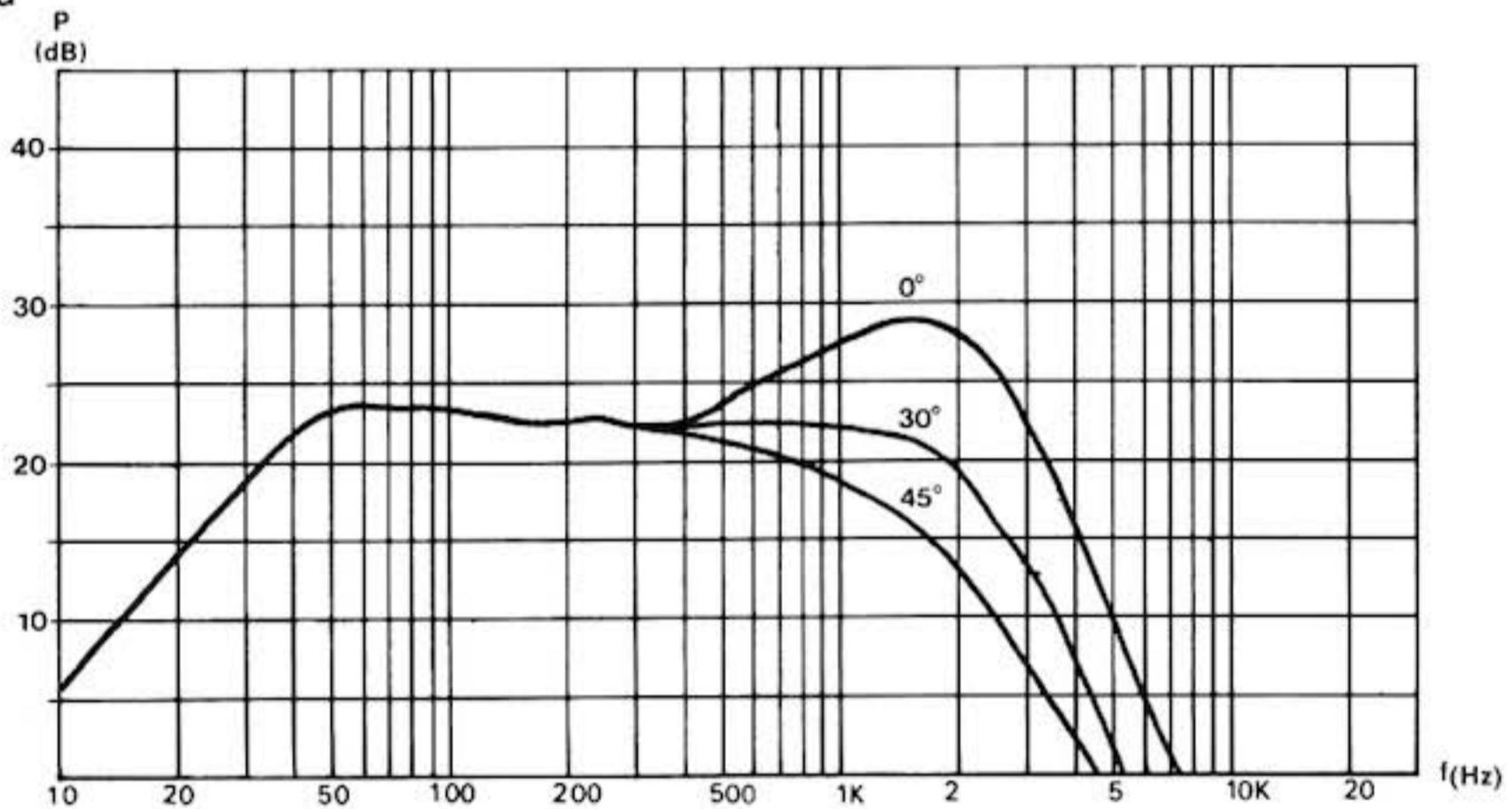
Bei einem 20 cm Chassis mit einem effektiven Membrandurchmesser von 16 cm (effektiver Radius ist 8 cm) liegt die Frequenz somit bei etwa 1250 Hz. Bei höheren Frequenzen wird je nach Membranform entweder zuviel nach vorne bzw. zuwenig zur Seite abgestrahlt, wie die Kurven in Bild 2.33 zeigen.

Es ist daher grundsätzlich wichtig, den Fre-

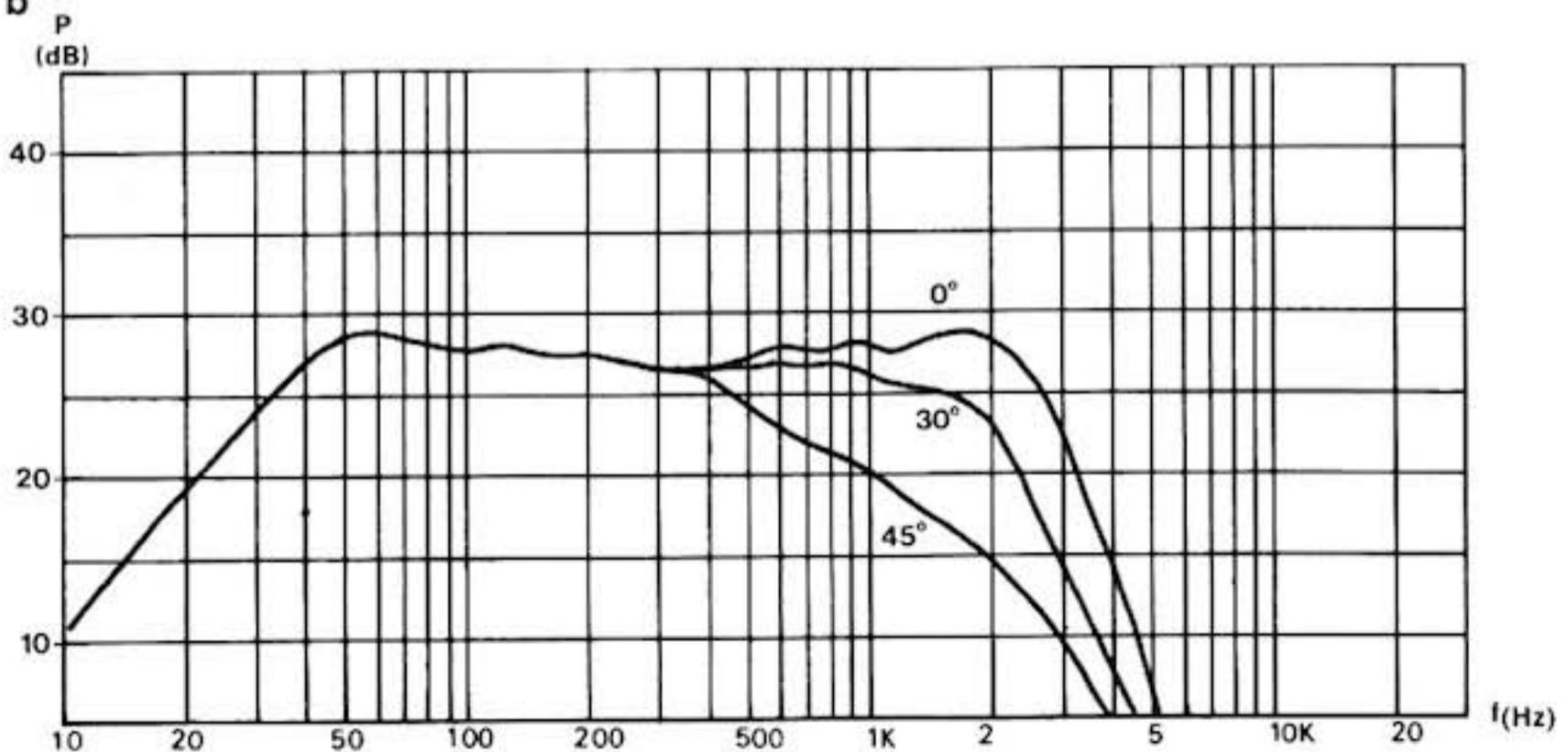
quenzbereich dieser Chassis nicht zu weit zu hohen Frequenzen über die Anpassungsfrequenz auszudehnen. Kompromisse zugunsten von 2-Wege Boxen sind nur dann sinnvoll, wenn das Hochtonchassis eine ausreichend

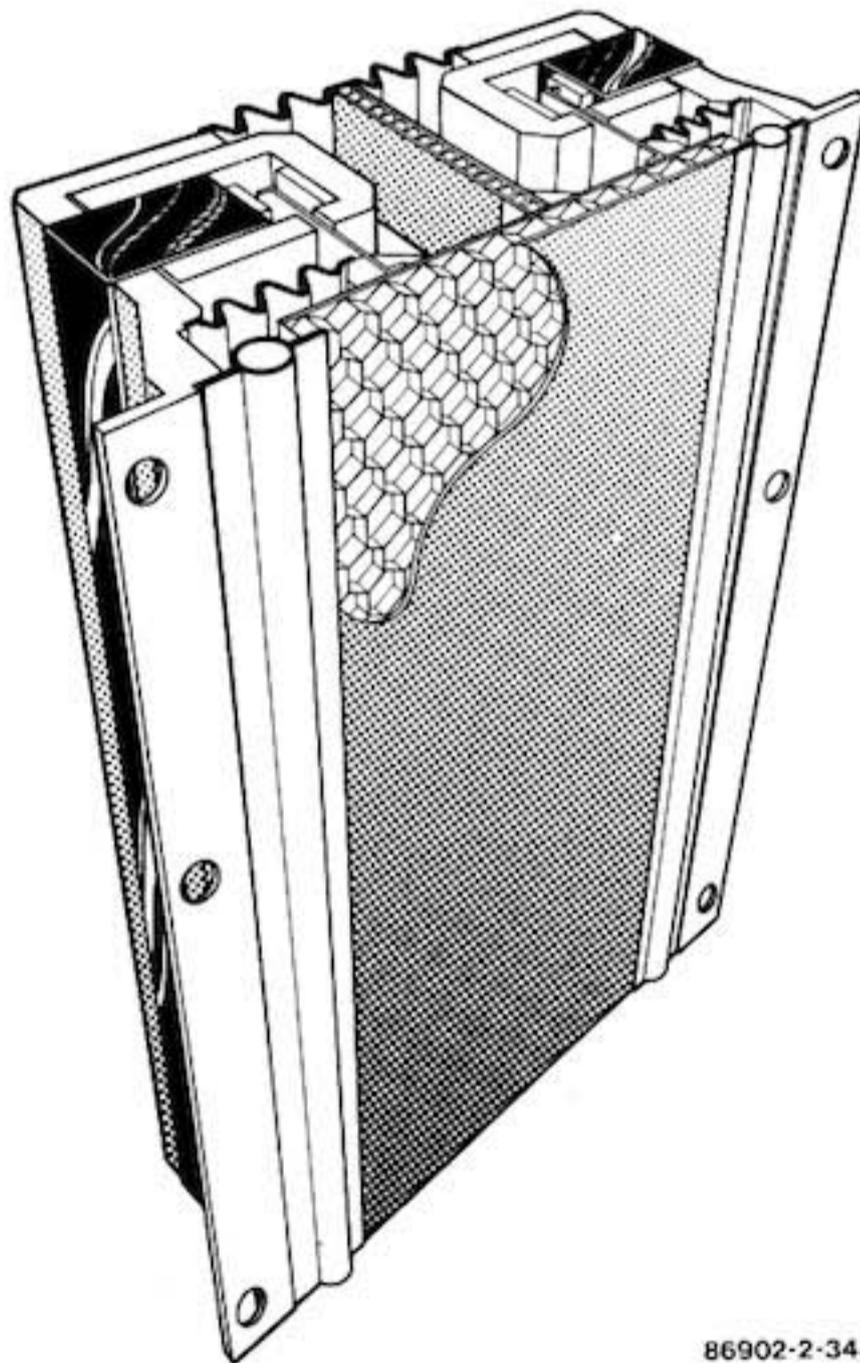
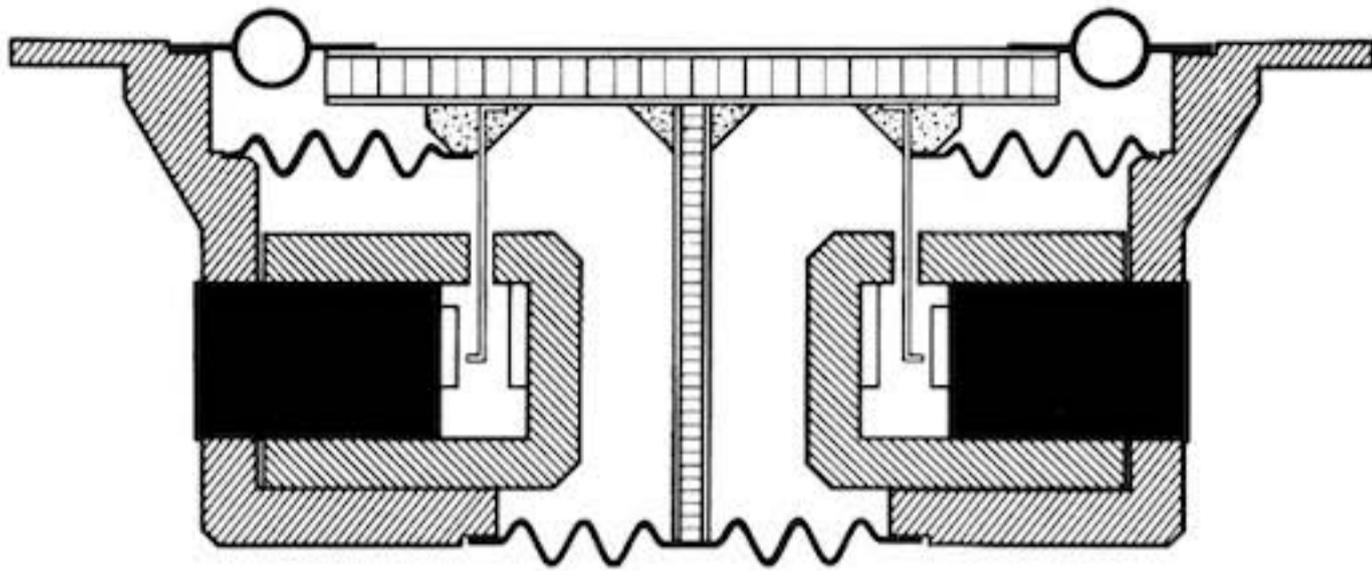
Bild 2.33. Je nach Membranmaterial und Membrangeometrie wird der Einfluß der Bündelung zu einer Überhöhung auf Achse oder rapider Verringerung des seitlich abgestrahlten Schallanteils führen. Membranmaterial und Membrangeometrie bestimmen also das Abstrahlverhalten.

33a



b





86902-2-34a

tiefe Trennfrequenz zuläßt. Bei passiven Lautsprecherboxen stellen sich hier einige konstruktive Probleme in den Weg, da Frequenzweichen mit großer Sperrwirkung nötig sind, um die Belastung des Hochtonchassis in Grenzen zu halten. Im Kapitel über Frequenzweichen werden wir zeigen, wie diese Weichen hoher Filterordnung gebaut werden können, ohne daß das angeschlossene Chassis die Berechnung stört.

Bei dem Chassis, das zu den Kurven in Bild 2.33a gehört, wäre noch ein Kompromiß möglich. Dazu muß man die Überhöhung auf etwa die Hälfte absenken; die Abstrahlung in den Raum ist dann noch immer recht gut. Bei Messungen gibt es allerdings Ärger, denn der Schalldruckverlauf auf Achse ist natürlich nie linear; das ist jedoch für einige Beobachter die wichtigste Voraussetzung für gute Hifi-Wiedergabe. Einfacher als mit runden Membranen kann die frequenzabhängige Bündelung mit rechteckigen oder ovalen Membranen beeinflußt werden. Hier kann der Konstrukteur die horizontale und vertikale Bündelung unabhängig voneinander festlegen (Bild 2.34a).

So wird dem Gehör ausreichend viel indirekter Schall von der Seite geliefert, während die vertikale Abstrahlung zuerst reduziert wird. Das gleiche Prinzip nutzen einige Mittel- und Hochtonhörner, deren rechteckige Hornöffnungen ebenfalls unterschiedliche horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristiken erzeugen. Beim Einbau sollte deshalb in manchen Fällen die lange Seite vertikal liegen, auch wenn das dann etwas merkwürdig aussieht. Auch eine andere Sparmaßnahme ist nicht immer unbedenklich, gemeint sind einfache Frequenzweichen vor den Tieftonchassis. Eine Forderung nach diesen Frequenzweichen folgt unmittelbar aus dem Einsatz von Filtern hoher Ordnung im Hochtonzweig, denn die Frequenzweiche sollte einigermaßen symmetrisch aufgebaut sein.

Es gibt aber noch einen anderen Grund hohe Frequenzen vor den Membranen solcher Tief- oder Mitteltonchassis abzufangen. Wie die Styropor-Membranen sind auch die

Sandwich-Membranen bei höheren Frequenzen oft sehr resonant; diese Resonanzen dürfen nicht angeregt werden, sonst kann das klangliche Ergebnis den hohen Preis dieser Chassis nachhaltig in Frage stellen. Das erfordert Frequenzweichen mit hoher Filtersteilheit, um die hohen Frequenzen im Sperrbereich wirkungsvoll abzuschwächen. Geschieht das nicht, dann können über Differenztoneffekte in den Tieftonchassis selbst Resonanzen im Hochtonbereich angeregt werden. Solche Frequenzweichen sind sehr schwer zu berechnen und zu realisieren, da als Abschlußwiderstand nicht ein reeller elektrischer Widerstand, sondern das Chassis (siehe elektrisches Ersatzschaltbild) angeschlossen ist. Hier sind Aktivboxen etwas im Vorteil, da das Chassis die Funktion der Frequenzweichen nicht beeinflußt. Die Übertragungsfunktion der Kombination Weiche-Chassis wird natürlich auch hier durch das Chassis mitbestimmt. Dazu aber später noch mehr.

Etwas andere Konstruktionskriterien gelten bei Hochtonchassis. Da diese Chassis an der oberen Grenze des hörbaren Frequenzbereichs arbeiten, bleiben Resonanzen, die bei noch höheren Frequenzen liegen, für Sie unhörbar. Gelingt es, die Membranresonanzen in Bereiche über 40 kHz zu verlagern, dann bleiben selbst alle Mischprodukte mit den Musiksignalen unhörbar (40 kHz - 20 kHz Musik = 20 kHz Differenzton). Hier lohnt sich der Einsatz extrem steifer (und resonanter) Metalle wie Beryllium und Titan. Es lassen sich Membranen herstellen, die auch die größten Beschleunigungen ohne jede Verformung überstehen. Das sind die idealen Voraussetzungen für perfekte Wiedergabe hoher Frequenzen.

Der Haken liegt wieder im Preis. Beryllium ist z.B. so hart, daß es sich nicht mehr verformen läßt; das treibt die Herstellungskosten nach oben. Bei einem japanischen Hersteller wurde Beryllium auf einen Träger aus Kupfer aufgedampft, das anschließend mit einem Schmelzvorgang wieder entfernt wurde. Diese Methode ist verständlicherweise nicht gerade kostengünstig und großserienfreundlich, was sich auch sofort im Preis für diese Chassis ausdrückte. Daneben ist das Material leider hochgiftig, was zu gefährlichen Rückständen führen kann, wenn eine solche Membran beschädigt wird und zersplittert. Aber die Klangqualität ist hervorragend.

Ebenso problematisch ist der Umgang mit

Bild 2.34a. Mit einer rechteckigen Membran hat der Konstrukteur mehr Möglichkeiten bei der Optimierung der Abstrahlcharakteristik. Bei mehreren Rechteckmembranen wird es noch besser, z.B. drei Stück leicht angewinkelt).

echtem Titan. Gemeint sind nicht die Membranen mit dem hauchdünn titanbeschichteten Aluminium, die fälschlicherweise häufig als Titankalotte bezeichnet wird. (Diesen Vorwurf können sich selbst manche Fachzeitschriften an den Hut stecken.) Echte Titanmembranen finden Sie daher auch nur bei sehr wenigen Herstellern zu den entsprechenden Preisen. Ein Beispiel ist die Membran für einen Mittelton-Hornstreiber von einem amerikanischen Hersteller (Bild 2.34a1).

Ein anderes Material mit sehr hoher Festigkeit ist glasfaserverstärktes Epoxydharz, das in Sandwichmembranen und in Hochtonchassis verwendet wird. Ein Beispiel hierfür ist das Chassis in Bild 2.34a2.

Hier hilft noch ein kleiner Trick, um die Membran weiter zu stabilisieren. Der Spulenträger ist nicht wie bei Kalotten sonst üblich am äußeren Rand der Membran angebracht, sondern da, wo die Membran durch die erste Resonanz verformt würde. Das ist jedoch nun nicht mehr möglich. Die inverse Form der Kalotte verbessert dabei das Abstrahlverhalten zur Seite gegenüber einer gleich großen Konkavkalotte, dafür wird der Frequenzgang auf Achse etwas wellig. Bevor Sie dem Hersteller jetzt diesen Schalldruckverlauf zum Vorwurf machen, denken Sie bitte an das Kapitel über Stereo-Wiedergabe in Räumen. Neben diesen Exoten sind die meisten Hochtonchassis recht konventionell aufgebaut. Als Membranmaterial dient imprägnierter Stoff oder Kunststoff mit hoher innerer Dämpfung. Die Membran-

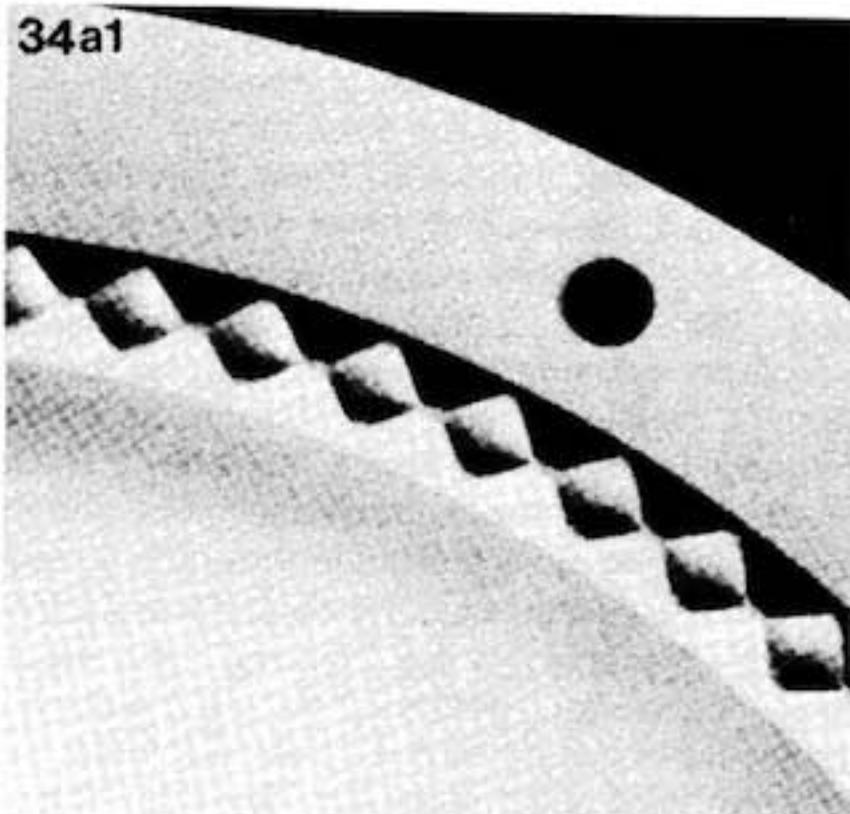
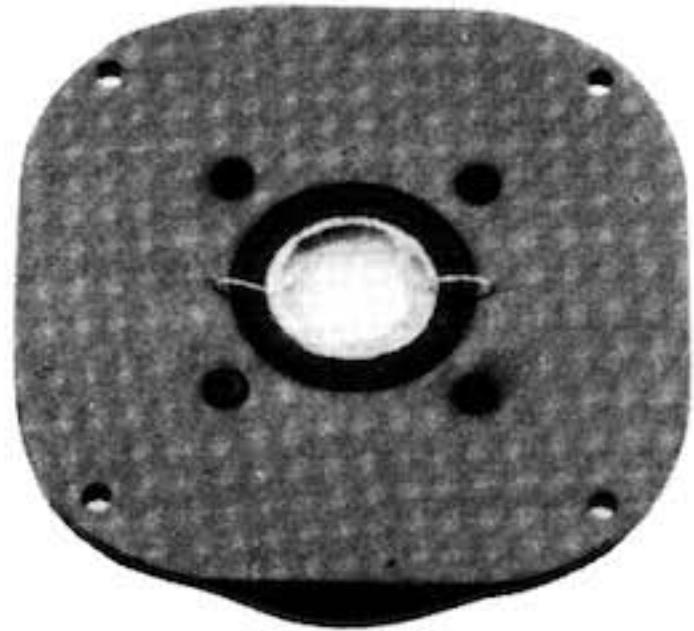


Bild 2.34a1.

34 a 2



34 a 3

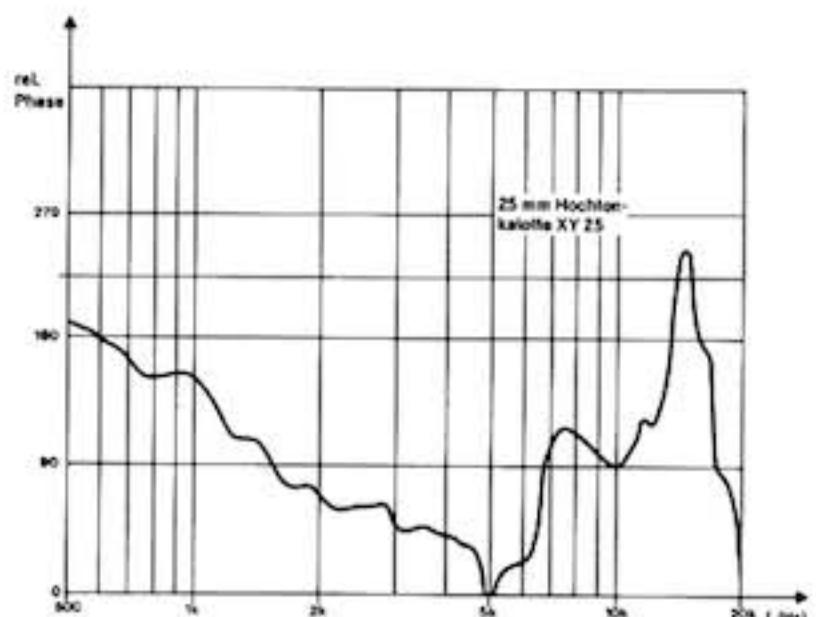
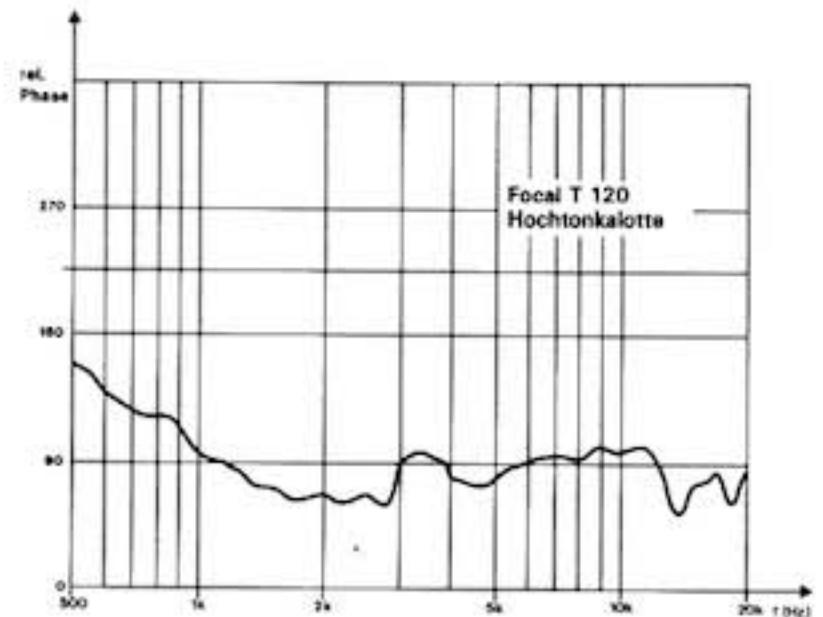


Bild 2.34a2.

Bild 2.34a3.

aufhängung ist aus Kostengründen aus demselben Stück gefertigt. Daraus resultiert immer eine recht hohe Eigenresonanz, was einige Planung bei der geeigneten Frequenzweiche und Einsatzfrequenz erfordert. Bei exakter Planung können hier jedoch auch preiswerte Kalotten durch sehr guten Klang überzeugen. Vorsicht ist dagegen immer dann angebracht, wenn die Werbeabteilungen bestimmte Vorteile sehr deutlich herauskehren. Die Zeichnungen in Bild 2.34.a3 zeigen das Amplituden- und Phasenverhalten einer bekannten konventionellen Hochtonkalotte und das von zwei neuen sogenannten Titankalotten deutscher Fertigung. So erfolgreich scheint das Titan hier nicht gewesen zu sein.

Viele der bekannten Soft-Dome Kalotten bringen hier ähnlich gute Ergebnisse. Diese Hochtonchassis finden in den meisten Fertigboxen und Bauvorschlägen Verwendung. Die oft geringen klanglichen Unterschiede, verglichen mit den gravierenden Auswirkungen der Frequenzweiche oder Schallwandmontage, machen es hier unmöglich, konkrete Empfehlungen zu geben. Bei fast allen diesen Hochtonchassis ist ein Kompromiß unvermeidlich. Für eine sinnvolle untere Grenzfrequenz von etwa 2,5 kHz ist die Membran meist so groß, daß eine Bündelung der Schallabstrahlung oberhalb von 10 kHz eintritt. (Die Hersteller ersparen sich mit den größeren Membranen und entsprechend geringerer Auslenkung sehr viel

Aufwand bei der Membranaufhängung.)

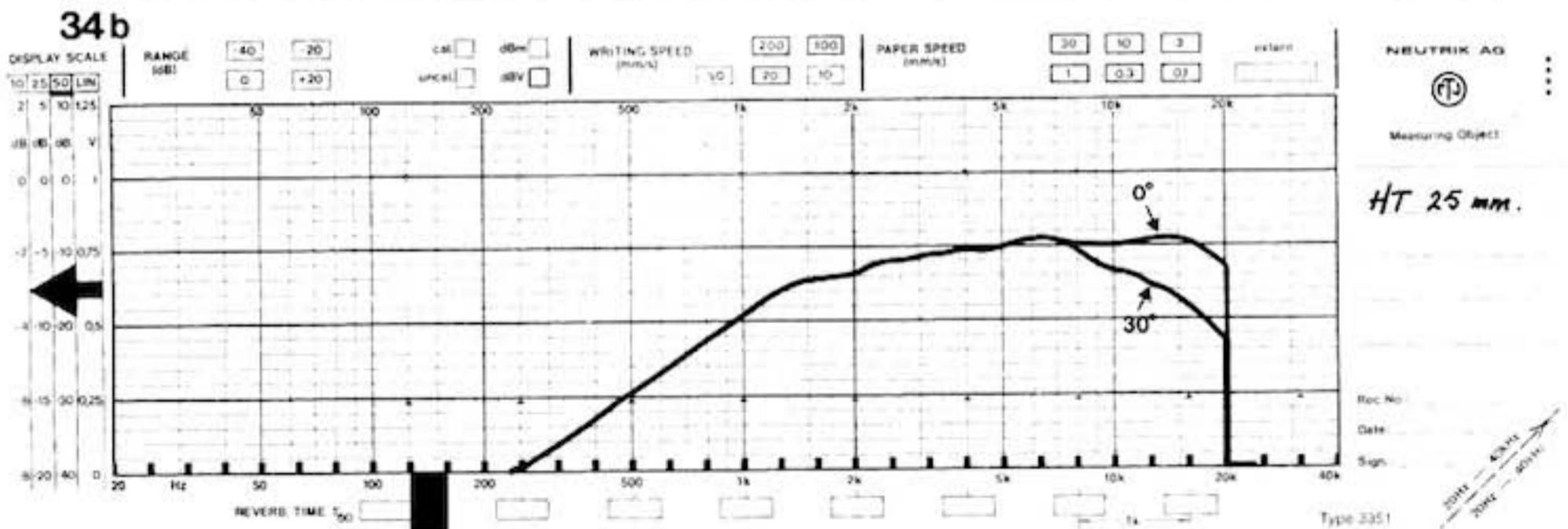
Das Diagramm in Bild 2.34b zeigt den Schalldruckverlauf einer 25 mm Kalotte.

Wenn Sie hier das Abstrahlverhalten bei höchsten Frequenzen verbessern wollen oder müssen, weil in der Box eine noch größere Hochtonkalotte oder ein Exemplar mit Hornvorsatz eingesetzt ist, dann müssen Sie ein Superhochtonchassis verwenden. Diese Chassis gibt es in der Tauchspulenversion, wobei die Membrandurchmesser oft nur wenige Millimeter betragen. Vorgesetzte akustische Linsen ermöglichen selbst bei höchsten Frequenzen noch eine ungerichtete Abstrahlung. In dieser Hinsicht sind die kleinen Tauchspulenchassis erheblich besser als Hornlautsprecher, Bändchenhochtöner sowie deren isodynamische Kollegen mit Plastikfolien als Membranmaterial, die vom Handel immer so gerne als Superhochtöner verkauft werden. Das Foto (Bild 2.34.b1) zeigt ein Tauchspulenchassis, den Typ SH 26 des japanischen Herstellers Coral.

Dieses Chassis, mit einer Membran aus sehr hartem Duraluminium kann klanglich voll überzeugen. Allerdings haben die Hersteller mit diesen winzigen Konstruktionen auch ihre Schwierigkeiten. Da es bei der Fertigung um Bruchteile von Millimetern geht, kann es immer wieder zu Ausreißern mit anormalem Schalldruckverlauf kommen.

Wenn Sie jetzt nach diesen Zeilen über Tief-, Mittel-, Hoch- und Superhochtöner die berechtigte Frage stellen, ob der Aufwand mit vielen verschiedenen Chassis unbedingt sein muß, so führt das zur Gruppe der Breitbandchassis.

Bild 2.34b. Fast alle Hochtonchassis mit 25 mm Membranen zeigen oberhalb von 8 kHz Bündelungseffekte.



34b1

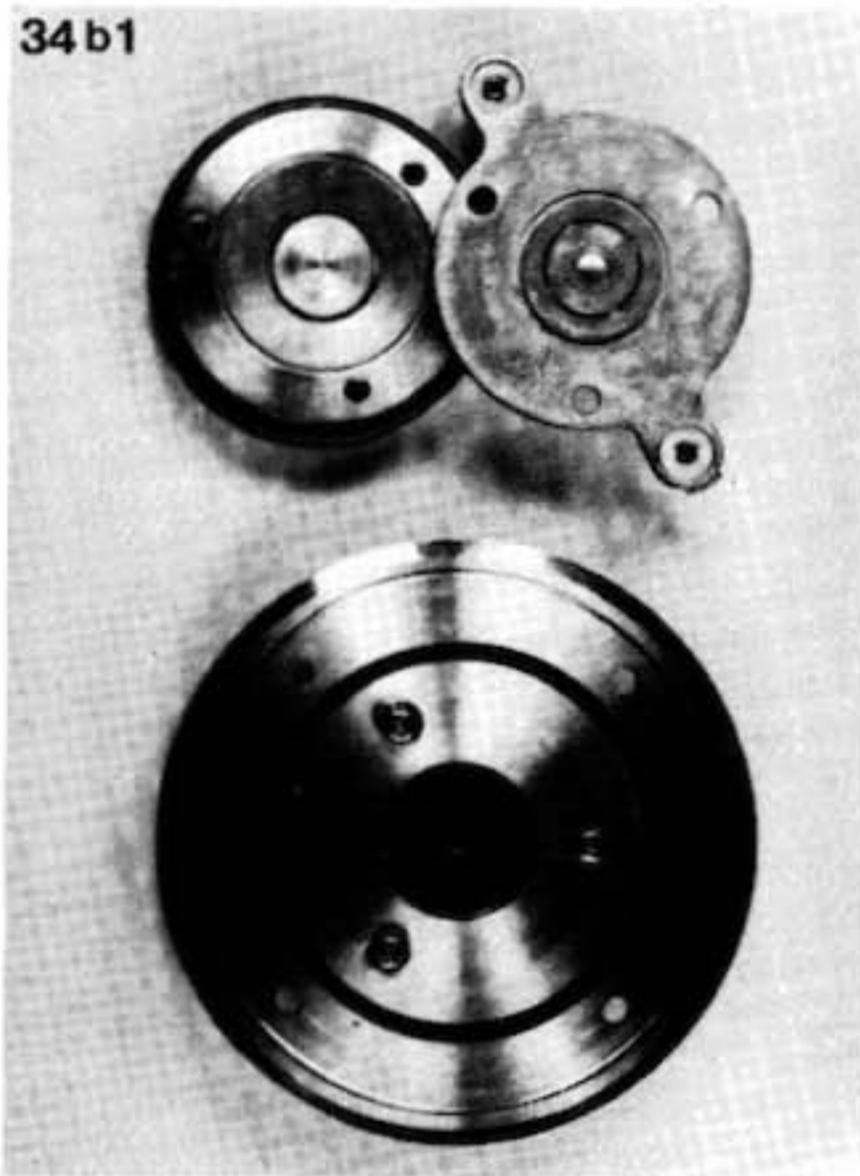


Bild 2.34b1.

Breitbandchassis

Die Idee klingt überzeugend. Nur ein Chassis, damit es keinen Ärger mit den Frequenzweichen und auch keine Interferenzen zwischen den einzelnen Chassis gibt. Bei Mehrwegeboxen kann der Schalldruckverlauf immer nur für eine bestimmte Abstrahlrichtung optimiert werden, da die Chassis verschiedene Positionen auf der Schallwand haben (Bild 2.34c). Wird nur ein Chassis eingesetzt, treten diese Probleme ebensowenig auf wie die, die durch eine Frequenzweiche verursacht werden können. Die Anhänger dieser Idee bringen hier gerne den Vergleich mit einem guten Kopfhörer; damit haben sie ja auch nicht so unrecht. Die Wiedergabequalität guter Kopfhörer kann die Wiedergabequalität selbst der besten Hifi-Boxen nachhaltig in Frage stellen. Das gilt besonders bei klassischer Musik oder Aufnahmen mit Kunstkopfmikrophonen; bei letzteren ist die Räumlichkeit mit zwei Lautsprecherboxen kaum reproduzierbar. Den Nachteil der Kopfhörer darf man allerdings auch nicht übersehen: sie sind nur bis zu einer extrem geringen akustischen Leistung gut. Wenige elektrische Milliwatt genügen, um die kleinen

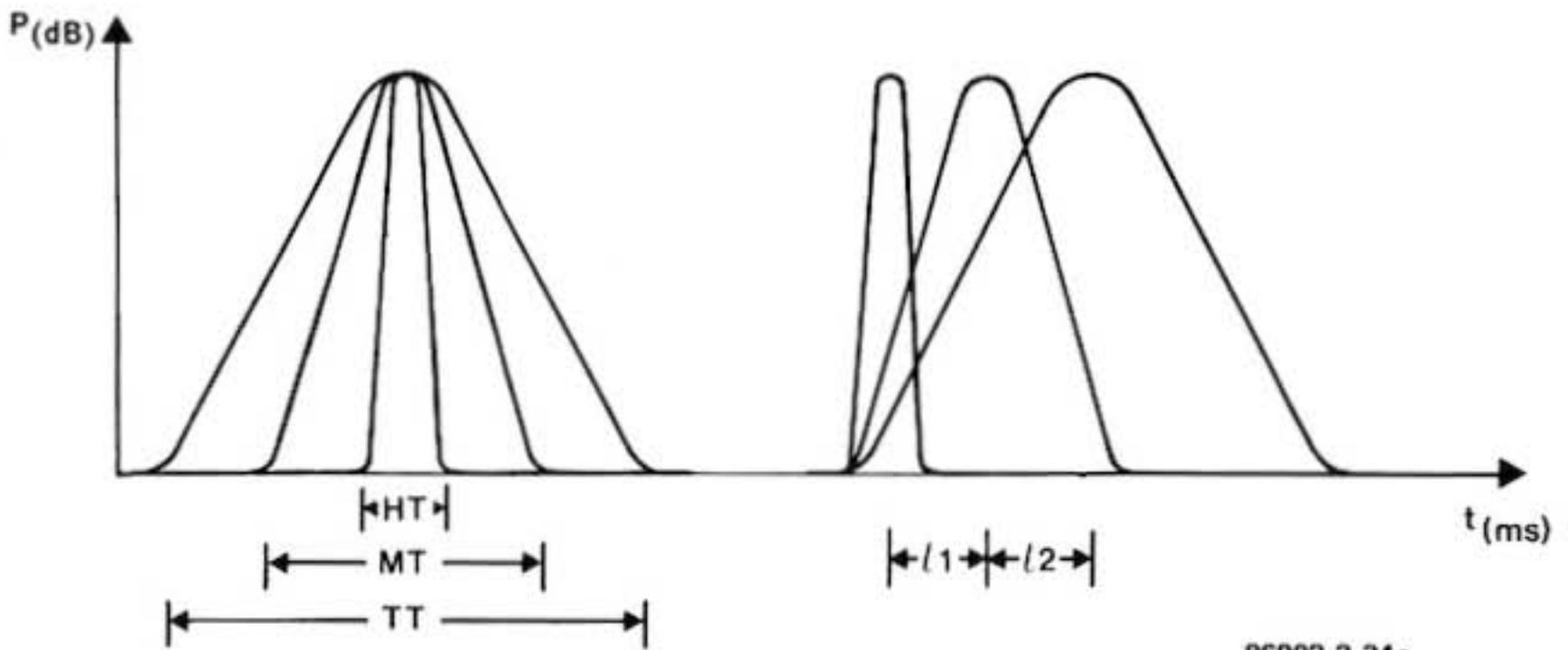
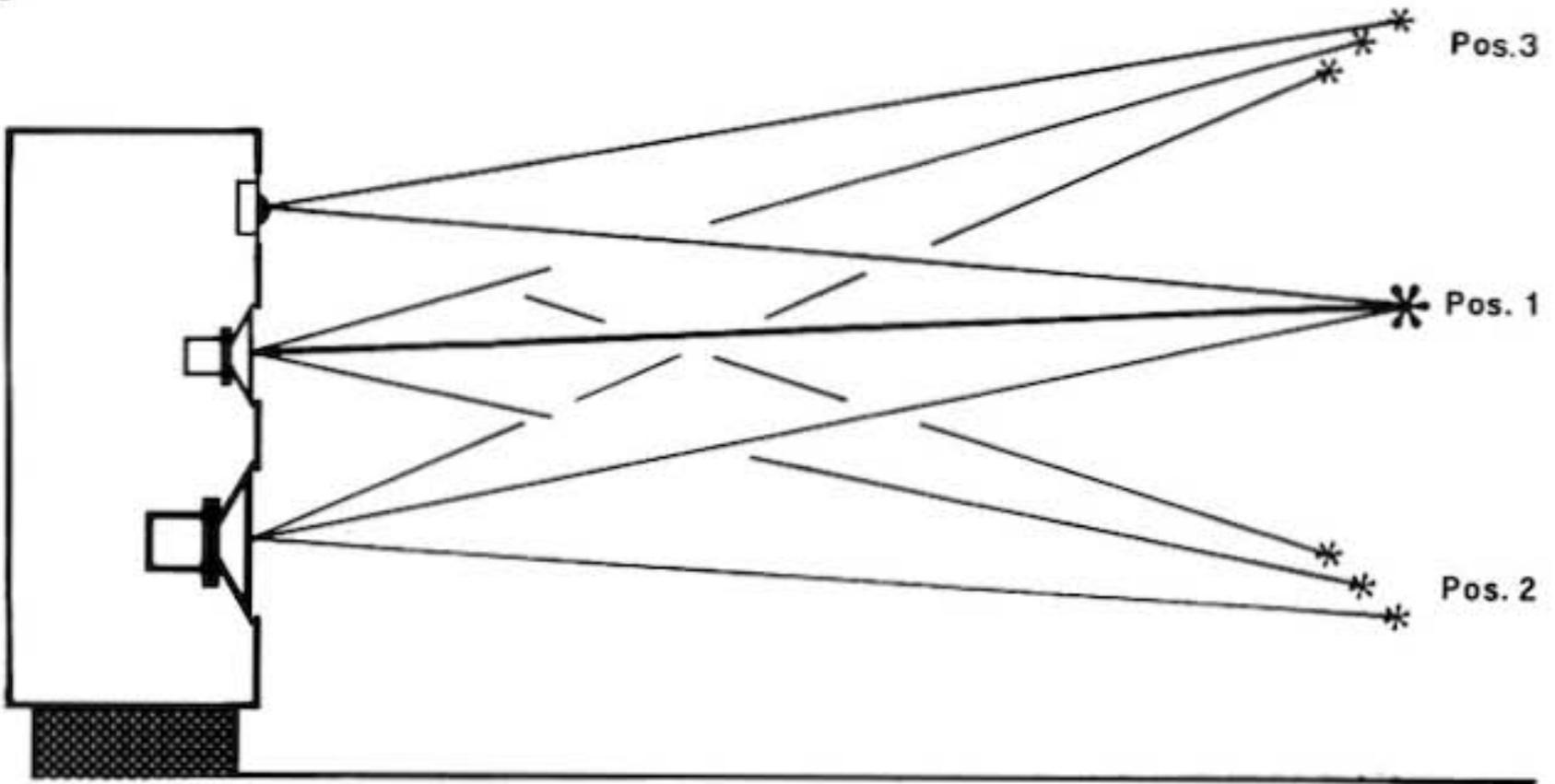
Membranen auszulenken und am Ohr ausreichend Schalldruck zu erzeugen. Bei der Lautsprecherwiedergabe ist das doch etwas anders.

Für eine gute Baßwiedergabe sind große Membranen notwendig, deren Gewicht und Fläche bei der Wiedergabe hoher Frequenzen recht störend ist. Das erfordert bei fast allen Breitbandchassis jede Menge Kompromisse. Der erste Kompromiß ist der eng begrenzte lineare Hub der Membran. Nur so kann man mit noch (für den Hersteller) vertretbarem Magnetaufwand ein ausreichend hohes BI-Produkt erzeugen. Das ist unbedingt erforderlich, um die hohe Massenträgheit der noch recht schweren Membran im oberen Mitteltonbereich zu überwinden. Eine Langhubschwingspule scheidet hier aus, da deren Induktivität, die im Quadrat zur Windungszahl steigt, dem Chassis bei hohen Frequenzen den Strom abdrehen würde. Das Kurzhubprinzip verlangt jetzt nach einem Lautsprechergehäuse, mit dem auch bei kleinen Membranauslenkungen laute Baßwiedergabe möglich ist: einem Baßhorn. Wenn Sie ausreichend Platz für etwa 1000 Liter große Lautsprechergehäuse haben (und das nötige Kleingeld), sind Sie aus dem Schneider. Vermutlich scheitert das Vorhaben jedoch an den Platzverhältnissen. Baßwiedergabe in kleineren Horngehäusen ist ohne Tricks und Experimente nur bis etwa 80 Hz hinab möglich. (Subwoofer helfen hier zum Glück weiter). Bei höheren Frequenzen hilft es dagegen weniger. Um bewegte Masse und Schallbündelung bei höheren Frequenzen zu verringern, muß die effektive Fläche der Membran verkleinert werden. Im Gegensatz zu den Tief- und Mitteltonchassis mit gut bedämpften Membranen, geht das hier aus physikalischen Gründen schief. Die bewegte Masse zur Hochtonwiedergabe muß drastisch reduziert werden. Genauer gesagt, die restliche bewegte Masse der Membran muß exakt der Masse der

Bild 2.34c. Bei Mehrwege-Boxen kann das Abstrahlverhalten nur für einen bestimmten Abstrahlwinkel optimiert werden. Bei allen andern Winkeln treten Laufzeitdifferenzen zwischen dem Chassis auf (I1, I2), deren Größe von der Frequenzweiche LS-Chassis und deren Anordnung bestimmt ist.

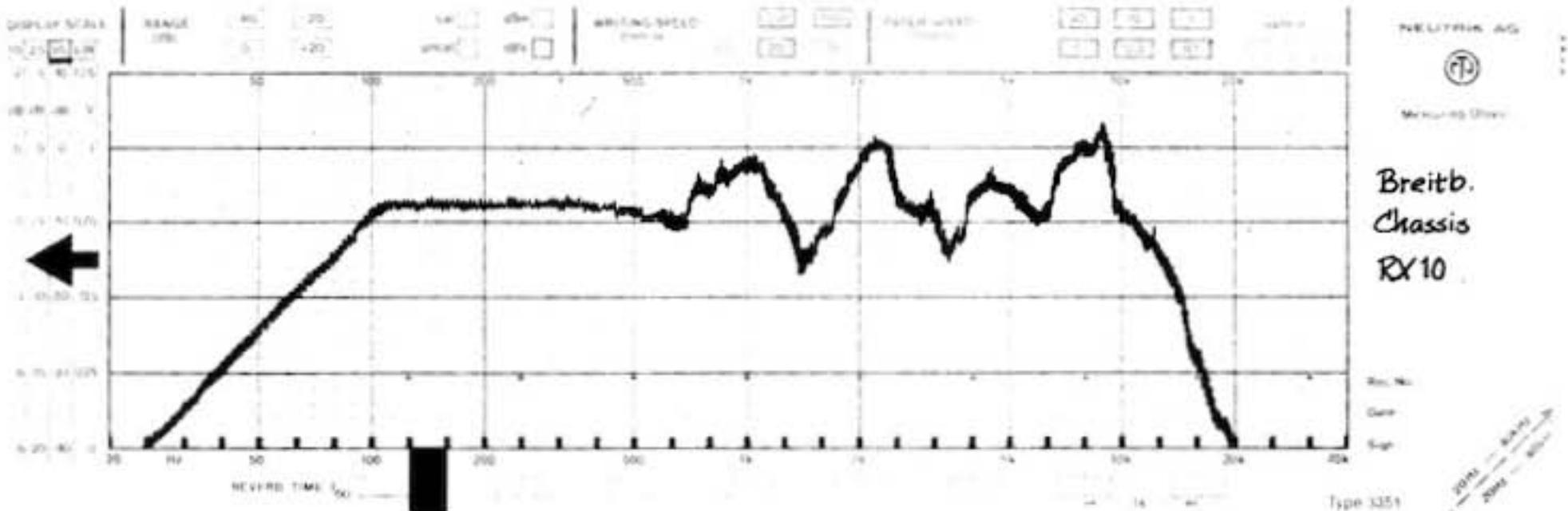
Bild 2.35. Schalldruckverlauf eines typischen Breitbandchassis.

34c



86902-2-34c

35



Schwingspule entsprechen, um den Wirkungsgrad im Hochtonbereich zu optimieren. Ein Breitbandchassis soll ja auch diesen Frequenzbereich noch gut hörbar abstrahlen. Bei solchen Konstruktionen, sofern sie bezahlbar bleiben sollen, kommt es immer zu ausgeprägten Resonanzen zwischen den schwereren und leichteren Teilmembranen. Diese können hier nicht ausreichend bedämpft werden, da mit einem bedämpfenden Material eine weitere bewegte Masse in der Berechnung für den Hochtonbereich stören würde. Weiterhin ist der Übergang zwischen den verschiedenen effektiven Membrangrößen nicht mehr gleichmäßig, sondern erfolgt stufenweise. Das ist, ebenso wie die Membranresonanzen, am Schalldruckverlauf deutlich zu sehen (Bild 2.35).

Aus dem Diagramm gehen auch die Einflüsse der Frequenzweichen deutlich hervor, die es bei den Breitbandchassis angeblich gar nicht geben darf. Die frequenzabhängige Auftrennung der Membran in unterschiedlich große Elemente erfolgt hier mechanisch, nicht elektrisch. Die Auswirkungen auf die Impulswiedergabe (Phasenlage oder Gruppenlaufzeit verschiedener Frequenzen) sind in beiden Fällen völlig analog. Nur ist die Bedämpfung einer elektrischen Frequenzweiche gegenüber der mechanischen erheblich einfacher.

Die Breitbandchassis sind oft gute Mitteltonchassis, aber mit der exakten und vollständigen Wiedergabe des heute auf Tonträgern vorhandenen Frequenzumfangs sind sie einfach überfordert. Lösbar ist diese Problematik nur mit extrem leichten Membranen. Sie erfordern keine gravierenden Masseänderungen, um auch höchste Frequenzen zu reproduzieren. Neben Bändchenlautsprechern und Elektrostaten gibt es noch ein bemerkenswertes Tauchspulenchassis, das auf diesem Weg klanglich geradezu unglaublich gute Ergebnisse liefert ist das Jordan 50 mm Breitbandchassis.

Bei der Konstruktion dieses Chassis wurde alles den klanglichen Ergebnissen untergeordnet. Eine nur ca. 1,3 Gramm schwere Membran ist so weich aufgehängt, daß die Eigenresonanz bei 75 Hz liegt. Damit sind die resonanten Elemente Masse und Feder fast völlig aus dem Spiel; die Verhältnisse sind hier besser als bei den meisten Elektrostaten und Bändchenlautsprechern für ähnliche Frequenzbereiche. Das verhilft dem Chassis zu ei-

ner phantastischen Impulswiedergabe. Der Haken an der Sache ist die kleine Membran, die mit 50 mm Durchmesser keine großen Luftmengen verschieben kann. Außerdem die leichte Schwingspule, deren elektrische Belastbarkeit auch nicht gerade besonders hoch ist. Beides ist eine Folge der kompromißlosen Konstruktion, die natürlich in Richtung Kopfhörertechnik geht. Mit einem mittleren Wirkungsgrad von 85 dB/Watt/1 m sind bei zulässigen 10...15 Watt im Mitteltonbereich noch knapp 97 dB in einem Meter Abstand das Maximum. Bei tieferen Frequenzen wird es deutlich weniger. Selbst mit einem zusätzlichen Tieftonchassis, das bis 200 Hz arbeitet, halten sich die realisierbaren Schallpegel in Grenzen, was eine weitere Verbreiterung dieses Chassis leider ausschließt. Gehören Sie aber zu den Hifi-Fans, die hinsichtlich der maximalen Lautstärke kompromißbereit sind (und denen liebe Freunde nicht immer den Lautstärkeregel des Verstärkers voll aufdrehen), können Sie mit diesem Chassis sehr gut leben. Die meisten sind sicherlich mit dem maximalen Schallpegel dieses Miniaturchassis nicht zufrieden; sie sind daher auf konventionellere Lösungen und Chassis angewiesen. Die oft recht schweren Membranen verlangen nach stabilen Aufhängungen mit vergleichsweise hoher Federsteife. An diesen Membranaufhängungen läßt sich recht gut bemessen, wie ernst es ein Hersteller mit der Hifi-Wiedergabe nimmt.

Aus den bereits gemachten Ausführungen wissen Sie, daß Membran und äußere Sicke als eine Einheit zu betrachten sind, weil sich einige Membranresonanzen nur über die Sicke bedämpfen lassen. Damit gehört zu jeder Membran eine individuell optimierte Sicke. Weiterhin ist je nach Linearität des Antriebs eine bestimmte (Nicht-)Linearität der Aufhängung nötig, um maximale lineare Auslenkungen zu ermöglichen.

Ein Hersteller, der notorisch immer wieder die gleiche Aufhängung für die verschiedensten Chassis einsetzt, ist bestimmt nicht als Perfektionist zu bezeichnen. Dabei könnte er zwischen denen in Bild 2.36 vorgeschlagenen Lösungen auswählen.

Stattdessen benutzen viele Tieftonchassis Sicken aus leichtem Kunststoff-Schaum mit hoher Nachgiebigkeit (Bild 2.37a).

Glauben Sie nicht, das leichte und weiche Material sei vorteilhaft. Der Hersteller erzielt da-

36a

"HALF-ROLL" Polynurethanschaum



b

"DOUBLE HALF-ROLL" Imprägniertes Stoff- oder Kunststoffgewebe



c

"MULTIPLE-ROLL" Imprägniertes Stoff- oder Kunststoffgewebe



d

"ONE PIECE CONE/COMPLIANCE" Imprägniertes Papier



e

"FULL-ROLL" nach H.F. Olson



Bild 2.36. Verschiedene äußere Membranaufhängungen (Sicken):

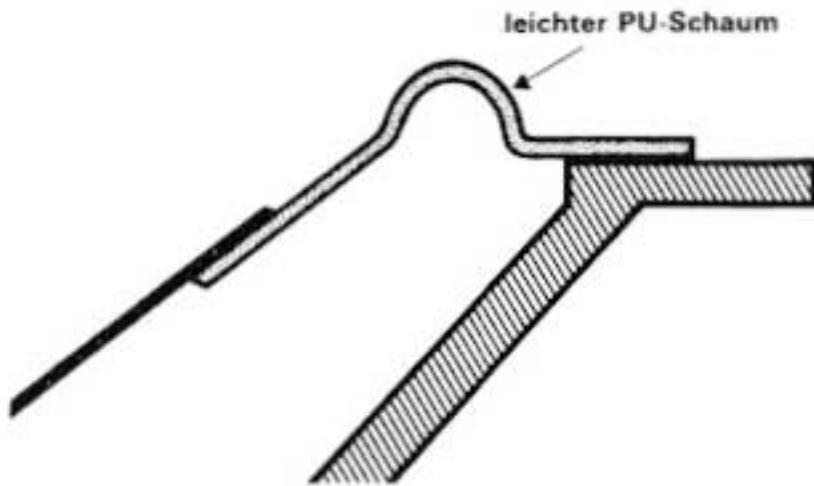
- Geringe Federsteife ermöglicht große Auslenkungen, erfordert aber eine sorgfältige Wahl der Zentrierspinne.
- Kann präzise auf eine Charakteristik der Federsteife abgestimmt werden.
- Langhubsicke, jedoch bekannt für Resonanzprobleme, die Einbrüche in der Schalldruckkurve verursachen.
- Steife, nichtlineare Aufhängung. Verursacht Resonanzpeaks (Schalldrucküberhöhungen) bei höheren Frequenzen. Musikerchassis.
- Sehr gute Linearität und geringe Federsteife bei hoher Festigkeit. Leider teuer und schwierig zu fertigen (nach H.F. Olsen).

mit preiswert nur einen verkaufsfördernden Wirkungsgrad, nimmt dafür aber Verzerrungen in Kauf. Bewegt sich nämlich die Membran nach außen, entsteht im Innern der Box ein Unterdruck, der die weiche Sicke regelrecht nach innen zieht. Bei einer Bewegung der Membran nach innen bleibt die Sicke dagegen weitgehend formstabil. Das Verhalten ist in den Zeichnungen des Bildes 2.37b dargestellt. Die Ergebnisse sind wieder unschöne Nichtlinearitäten bei der Wiedergabe.

Aus den Bildern in Bild 2.37b geht deutlich hervor, wie wichtig die immer mit Masse verbundene Stabilität bei allen Bauteilen eines Lautsprecherchassis ist.

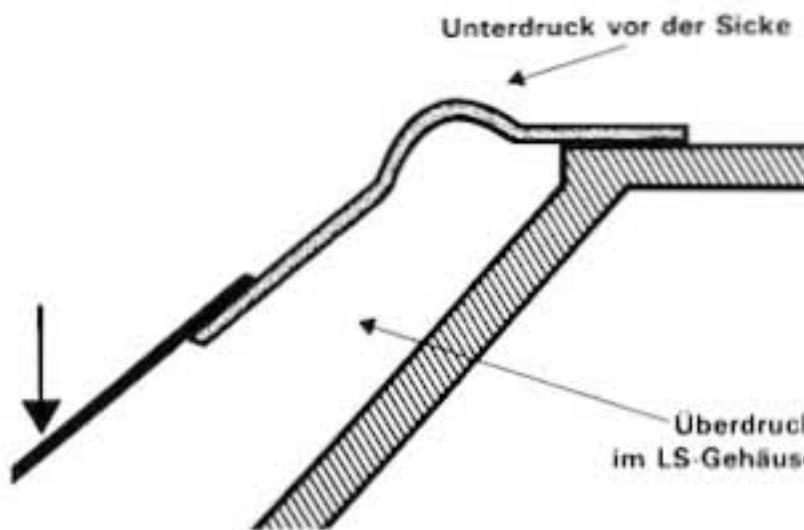
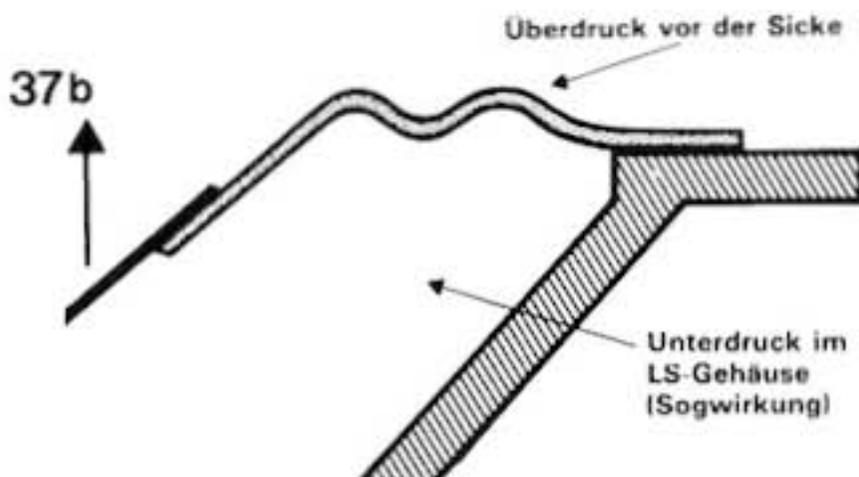
Wenn Sie versehentlich Lautsprecherchassis nach der geringsten bewegten Masse aussuchen oder bewerten, befinden Sie sich auf dem Holzweg (allerdings mit hohem Wirkungsgrad). Neben der Sicke besteht die Membranaufhängung aus mindestens einer Zentrierspinne. Auch für sie gilt natürlich: Geringes Gewicht ohne Stabilität ist, gelinde gesagt, ein Fall für den Mülleimer. Bei fast allen Chassis hat sich die Zentrierspinne (aus Kostengründen ?) aus imprägnierten Gewebe durchgesetzt. (Es stellt sich die Frage, warum die Chassishersteller neuen Technologien so zurückhaltend gegenüberstehen.) Wie auch immer, die Zentrierung erlaubt einigermaßen lineare Auslenkungen, hat aber den Nachteil, mit der Zeit auszuleiern. Beim Einbau in geschlossene Gehäuse ist das unkritisch, da hier die weit größere Federsteife durch die Luft im Gehäuse erzeugt wird. Anders bei offenen Bo-

37a



86902-2-37a

37b



86902-2-37b

Bild 2.37. Die Sicke aus Polyurethanschaum (a) ist sehr leicht und erhöht den Wirkungsgrad. Allerdings ist sie nicht sehr stabil (b), wodurch ernstzunehmende Verzerrungen entstehen.

nen, wie z.B. dem Baßreflexprinzip. Hier läuft das Chassis mit der Zeit aus der Abstimmung, wobei auch gleich die mechanische Belastbarkeit auf der Strecke bleibt; die ehemals saubere Baßwiedergabe kann ganz schön schlapp werden. Es bleibt dann nur noch die Möglichkeit, die Baßreflexöffnung abzudichten sowie die Baßwiedergabe aktiv (elektronisch) anzuheben und zu hoffen, daß das Chassis wenigstens etwas Langhubcharakter hat. Eine andere Möglichkeit ist es, die Membran an Federstäben zu befestigen (Bild 2.37c). Vorsicht! Diese Art der Aufhängung erzeugt Torsionsresonanzen (Verdrehung) in der Membran.

Eine kleine Auswahl bekannter Lautsprecherchassis

Im folgenden Teil lernen Sie einige Tauchspulenchassis mit ihren Besonderheiten kennen. Eines der größten Chassis dieser Art ist der Electro-Voice Baß SP 30 mit guten 75 cm Durchmesser. Was der Begriff Volume Displa-

37c

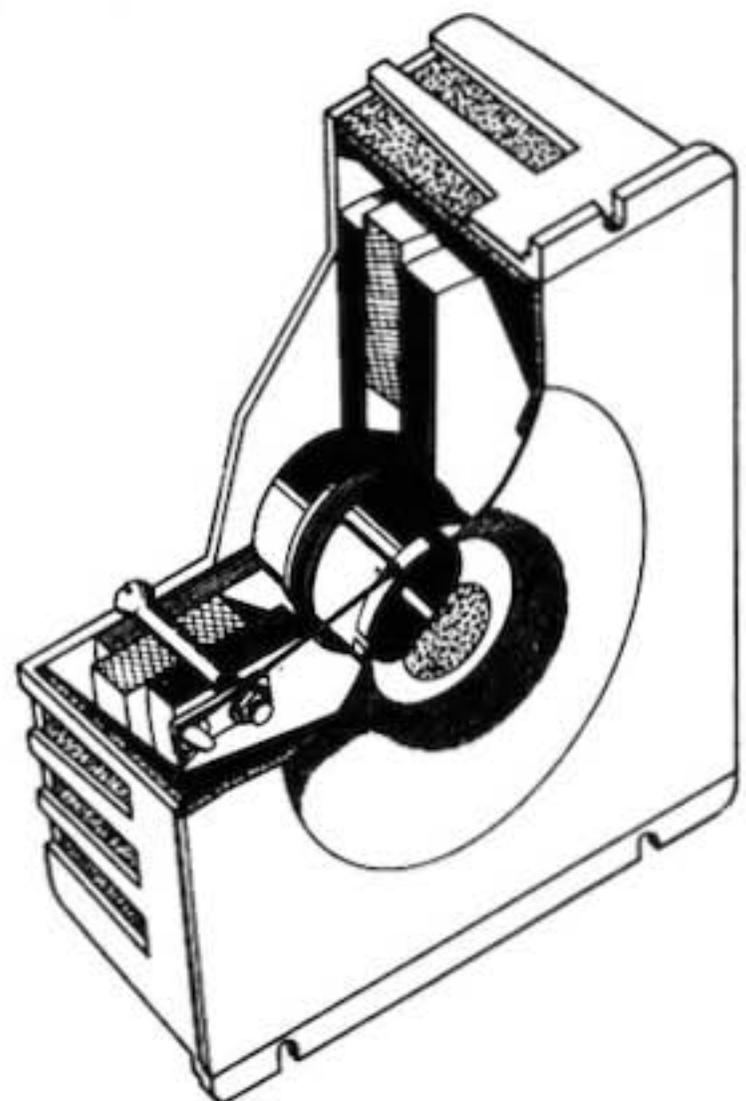
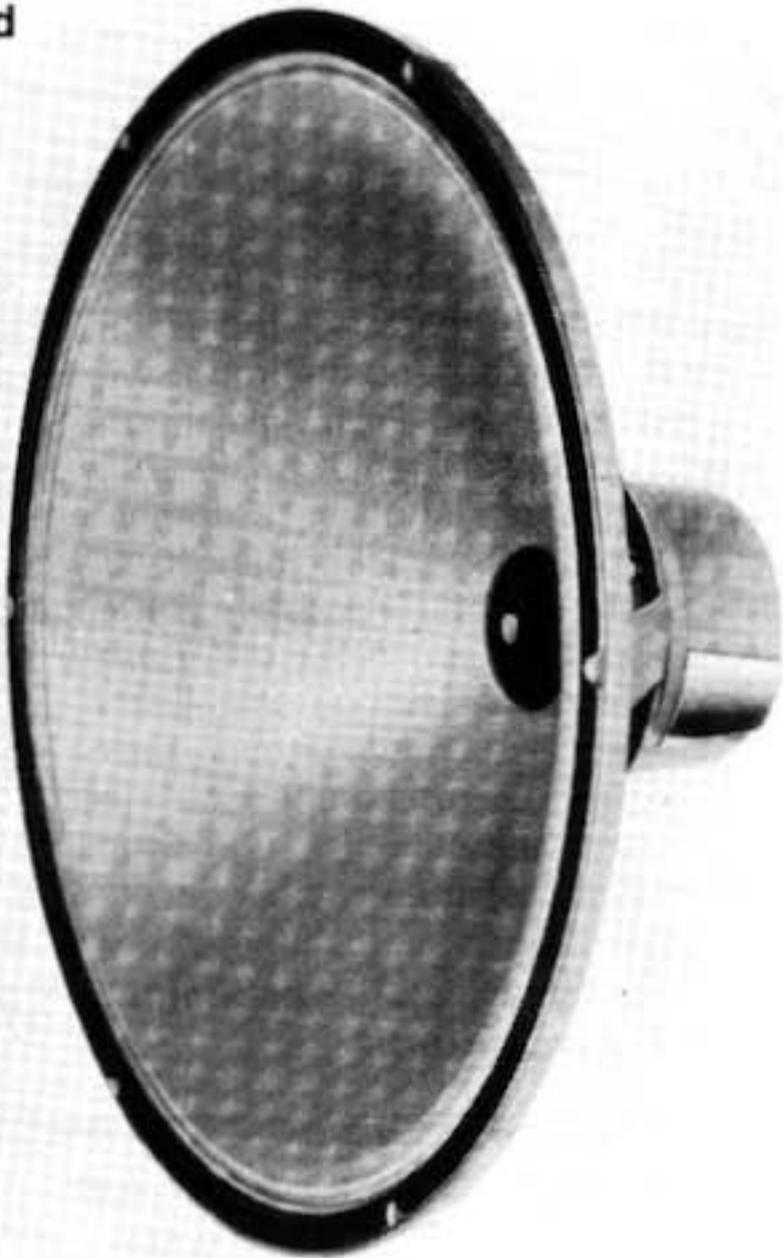


Bild 2.37c. Bei dem abgebildeten Jordan-Watts-Modul ist die Membran an drei CuBe-Federstäben aufgehängt.

37d



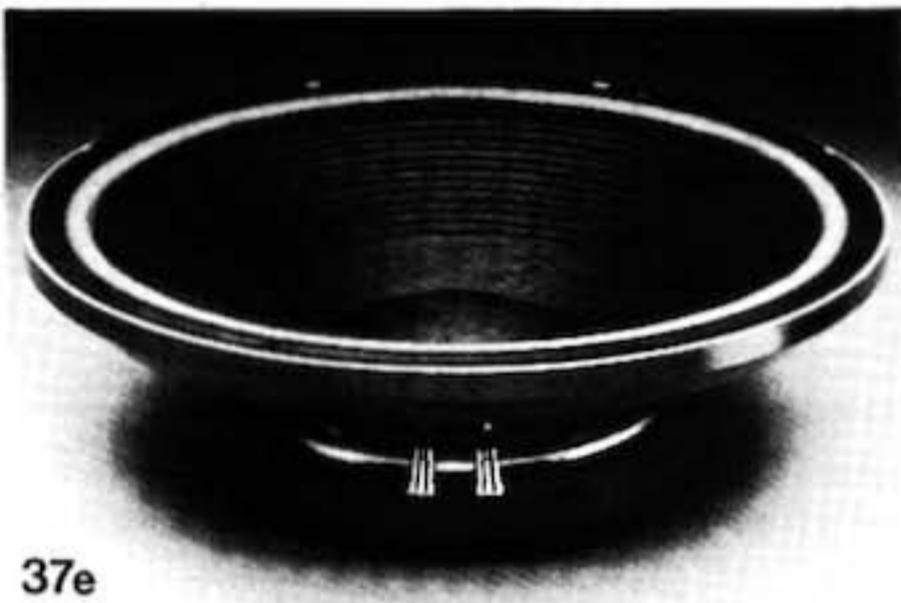
Baß 2245 mit 46 cm Durchmesser. Auch dieses Chassis ist ein echtes Langhubchassis für gründliche Baßwiedergabe auch in größeren Räumen und bei höheren Schallpegeln. Die Konstruktion des Antriebs wurde auf maximale lineare Auslenkung optimiert, daher ist der Wirkungsgrad nicht sehr hoch; der maximale Baßpegel dagegen sehr.

Anders sieht es bei den beiden folgenden Chassis aus, den Typen Studio 10 Bass und Studio 10M der englischen Firma Fane. Hier handelt es sich um sehr gute Musikerchassis, an die gegenüber den Hifi-Chassis völlig andere Anforderungen gestellt werden. Sie haben einen sehr hohen Wirkungsgrad und einen zum oberen Mitteltonbereich erweiterten Schalldruckverlauf. Diese Musikerchassis werden oft selbst als Musikinstrumente eingesetzt; statt naturgetreu zu reproduzieren erzeugen sie dann ihren eigenen Klang. Ein verbogener Schalldruckverlauf ist daher kein Manko, sondern durchaus erwünscht (wenn er richtig verbogen ist).

Betrachten Sie zu diesem die Datenblätter in Bild 2.38. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei dem BI-Produkt die Herstellerangaben voneinander abweichen, obwohl Magnet und Hub identisch sind.

Trotz des identischen Magneten und des unterschiedlichen BI-Produktes ist der gleiche Membranhub angegeben. Es handelt sich vermutlich dabei nicht um den linearen Hub, sondern um die maximal zulässige Auslenkung, oberhalb der das Chassis mechanisch beschädigt wird (engl. Damage limited excursion). Die sagt aber nichts über die Leistungsfähigkeit des Chassis aus, da uns nur das lineare Volume Displacement interessiert. (Es wäre nett, wenn der Hersteller bzw. Importeur diesen Wert auch noch veröffentlichen würde.)

Die Koaxialchassis sind eine Kombination mehrerer Chassis in einer Einheit. Wie bei den Breitbandchassis wird auch hier eine ausgeglichene Abstrahlung über alle Raumwinkel angestrebt. Da die Koaxialchassis konzentrisch (ineinander) angeordnet sind, ergibt sich im besten Fall eine Abstrahlung wie bei einer punktförmigen Schallquelle. (Allerdings sind in der Regel noch spezielle elektronische Verzögerungseinheiten, sogenannte Delays, nötig.) Das merkwürdig geformte Horn vor dem Mittelhochtonchassis ist notwendig, um eine ausgeglichene Abstrahlung über den gesam-



37e

Bild 2.37d. Electro-Voice SP30.

Bild 2.37e. 46-cm-Tieftonchassis des amerikanischen Herstellers JBL (Modell 2245).

ment bedeutet, kann dieser Baß eindrucksvoll demonstrieren; immerhin hat er eine Luftverdrängung von etwa 0,4 Liter. Als Gegenleistung verlangt er allerdings nach Gehäusen mit guten 2000 Liter Nettovolumen, was neben dem Preis ein beträchtliches Handicap darstellt. Schon etwas handlicher ist der JBL

ten oberen Frequenzbereich zu erhalten. Bei diesem Chassis finden Sie eine der seltenen Doppelzentrierungen sowie präziseste Fertigung bei allen Bauteilen (den Preis können Sie sicherlich erraten). Jedenfalls ist das hochkarätige Studioteknik.

Es geht auch ohne Magnet. Der effektive Wirkungsgrad sinkt dabei allerdings beträchtlich ab. Dieses Chassis wurde für den Einsatz mit speziellen Reibungswiderständen entwickelt, den Variovents (andere funktionieren natürlich auch). Wenn Sie über einen guten Verstärker verfügen, dann spielt der Wirkungsgrad kaum noch eine große Rolle. Dank der 10 cm Schwingspule werden Sie das Chassis damit auch nicht ruinieren. Das Magnetsystem wurde für große lineare Auslenkungen und verzerungsarme Mitteltonwiedergabe konstruiert. Das geht aus dem Herstellerdiagramm (Bild 2.38b) deutlich hervor. (Obwohl der Wert für V_d bzw. X_{lin} so aussieht, als wäre er versehentlich für beide Richtungen zusammengesetzt worden.)

Das Membranmaterial ist mit speziellen Einlagerungen versehen, um die Membranresonanzen zu bedämpfen. Das Chassis ist so bis zu ungefähr 700 Hz verwendbar.

Das Chassis (Bild 2.38c) verfügt über eine einzigartige Hartschaum-Membran mit sehr hoher innerer Dämpfung. Damit wird eine ungewöhnlich formstabile und resonanzarme Membran realisiert, deren Impulswiedergabe unter Hifi-Fans und Profis gleichermaßen einen sehr guten Ruf genießt. Die oft in diesem Zusammenhang gehörten Kommentare wie sehr schnelle Wiedergabe (die oft auf die angeblich sehr leichte Membran zurückgeführt werden), treffen hier nicht des Pudels Kern. So leicht ist die Membran nämlich nicht, es gibt 30 cm Chassis mit leichteren Membranen. Der Vorteil liegt woanders. Mit der Hartschaum-Membran ist die Stabilität so hoch, daß die Membran selbst bei starken Im-

Bild 2.38. Ein Beispiel für kleine Fallgruppen in Datenblättern.

38

Technische Daten elektromechanisch:		Technische Daten Materialien:	
Chassisdurchmesser	254 mm	Spulenträger	Glasfiber
Impedanz	8/16 Ω	Schwingspule	Aluminium Polyamid-Imid-beschichtet
Leistung	200W	Magnet	A.P.S. Ferrit
Resonanz	70 Hz	Chassis	Druckguss, AL10Z-Legierung
nutzbarer Frequenzbereich (-6 dB)	60 Hz-6KHz	Konus	gleichm. ringförmiges Papier
durchschnittliche Empfindlichkeit 1W, 1m	102dB	Konusaufhängung	plastiziertes Leinen
Flußdichte	14.600 Gauss	Kalotte	Mehrschicht-Papier
gesamte magnetische Dichte	190000 Maxwells	Anschlüsse	Federklemmen
Höhe der Polplatte	6,35 mm	Leistung optimiert für:	Mittbereich von 500 Hz bis 6 KHz in Mehrwegsystemen
Magnetgewicht	2,4 kg	andere Anwendungsgebiete	P.A. (Gesang), Keyboards & Bass, Discotheken, Monitore
Magnetgewicht incl. Polplatte	6,8 kg		
Durchmesser der Schwingspule	63,7 mm (2 1/2")		
max. Auslenkung	11 mm		

Thiele-Small Parameter	
Resonanzfrequenz (fs)	73 Hz
Impedanz (Re)	5,7 Ω
Spuleninduktivität	0,65 mH
Q elektromagnetisch (Qes)	0,38
Q mechanisch (Qms)	3,25
Q gesamt (Qts)	0,34
äquivalentes Compliance-Volumen (Vas)	27,2 Liter
Referenzwirksamkeit (%)	3%
Luftverdrängung (Vd)	0,32 Liter
Elastizität (Cms)	1,8 MN, x 10 ⁻⁴
BL	11,9 TESLA/M
Membran-Masse incl. air load (Mms)	26 gr.
äquivalenter Widerstand des mechanischen Aufhängungsverlustes (Rms)	3,7 Ω

86902-2-38 Studio 10M

Technische Daten elektromechanisch:		Technische Daten Materialien:	
Chassisdurchmesser	254 mm	Spulenträger	Glasfiber
Impedanz	8/16 Ω	Schwingspule	hochkant gewickelter Aluminium- flachdraht, Polyamid-Imid-beschichtet
Leistung	150W	Magnet	A.P.S. Ferrit
Resonanz	35 Hz	Chassis	Druckguss, AL10Z-Legierung
nutzbarer Frequenzbereich (-6 dB)	50 Hz-2KHz	Konus	gleichm. ringförmiges Papier
durchschnittliche Empfindlichkeit 1W, 1m	98dB	Konusaufhängung	P.V.C.
Flußdichte	14.600 Gauss	Kalotte	Mehrschicht-Papier
gesamte magnetische Dichte	190000 Maxwells	Anschlüsse	Federklemmen
Höhe der Polplatte	6,35 mm	Leistung optimiert für:	Tiefbass in abgestimmten Gehäusen oder Mehrwegsystemen
Magnetgewicht	2,4 kg	andere Anwendungsgebiete	P.A. (Gesang), Disco- theken, Bühnenmonitore
Magnetgewicht incl. Polplatte	6,8 kg		
Durchmesser der Schwingspule	63,7 mm (2 1/2")		
max. Auslenkung	11 mm		

Thiele-Small Parameter	
Resonanzfrequenz (fs)	33 Hz
Impedanz (Re)	5,6 Ω
Spuleninduktivität	0,69 mH
Q elektromagnetisch (Qes)	0,15
Q mechanisch (Qms)	2,60
Q gesamt (Qts)	0,14
äquivalentes Compliance-Volumen (Vas)	83 Liter
Referenzwirksamkeit (%)	2,1%
Luftverdrängung (Vd)	0,32 Liter
Elastizität (Cms)	4,6 MN, x 10 ⁻⁴
BL	20,2 TESLA/M
Membran-Masse incl. air load (Mms)	50 gr.
äquivalenter Widerstand des mechanischen Aufhängungsverlustes (Rms)	4 Ω

86902-2-38 Studio 10 Bass

pulsen, wie z.B. Trommeln, Kesselpauken und anderen Schlaginstrumenten ohne Verfor-

38a

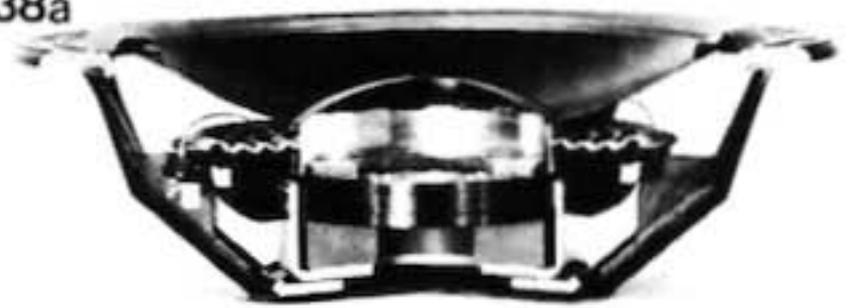
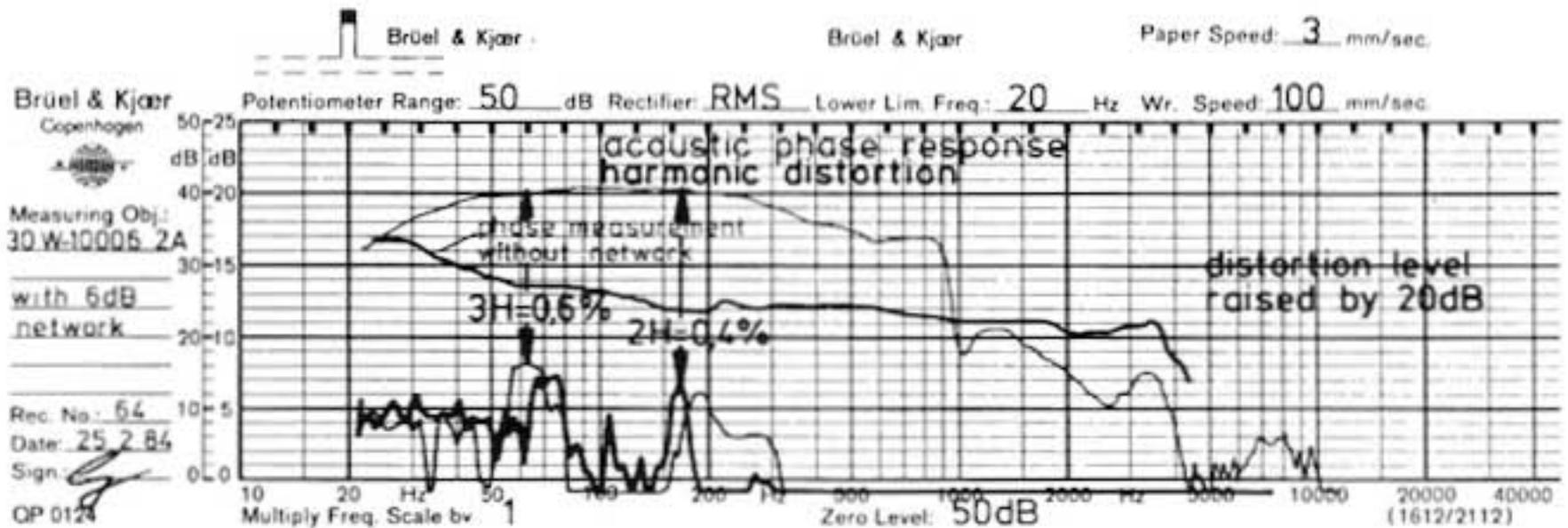


Bild 2.38a. Dynaudio 30 W 100.

Bild 2.38b. Datenblatt zu 30 W 100.

38b



Compliance:		Overall dimensions:		300 x 104,5 mm	
suspension	C_{ms}	$1,21 \cdot 10^{-3} \text{ m/N}$	Power handling:		
acoustic	C_{as}	$1,94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^5/\text{N}$	*nominal	DIN	450 W
equivalent volume	V_{as}	269 l	*music	DIN	600 W
Cone:		transient		10 ms	1000 W
eff. cone area	S_D	400 cm^2	Q-factor:		
moving mass	M_{ms}	35,2 g	mechanical	Q_{ms}	2,70
lin. volume displacement	V_d	320 cm^3	electrical	Q_{es}	0,803
mech. resistance	R_{ms}	1,98 kg/s	total	Q_{ts}	0,619
lin. excursion P-P	X_{max}	8 mm	Resonance frequency free air: f_s		24 Hz
max. excursion P-P		28 mm	Rise time		89 μs
*Frequency response:		22-900 Hz	Sensitivity:	IW/lm	91 dB
Harmonic distortion:		< 0,8 %	Voice coil:		
Intermodulation distortion:		< 0,6 %	diameter	d	100 mm
Magnetsystem:			length	h	16 mm
total gap flux		$1300 \mu\text{ Wb}$	layers	n	2
flux density		0,51 Tesla	inductance (1 kHz)	L_e	0,73 mH
gap energy		445 mWs	nom. impedance	Z_{vc}	8 Ω
force factor	$B \times L$	6,26 Tm	min. impedance	Z_{min}	6,4 Ω
air gap volume	V_g	$4,27 \text{ cm}^3$	DC resistance	R_e	5,85 Ω
air gap height		8 mm			
air gap width		1,68 mm			
Net weight:		2,1 kg	Data given are as after 30 hours of running		
			*Depends on cabinet construction		

*Thiele/Small parameters are measured not statically but dynamically.

Technische Änderungen vorbehalten

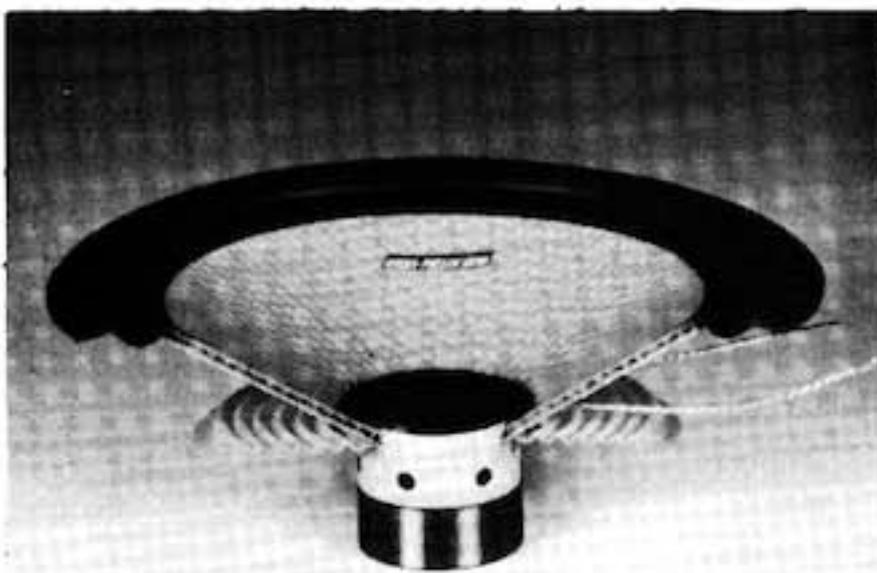
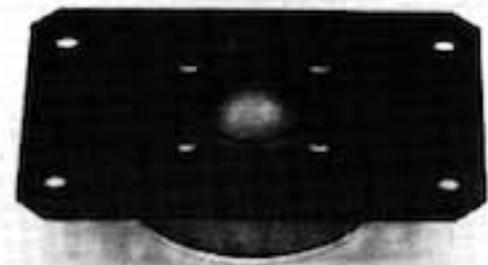
38c**38f****38d****38e**

Bild 2.38c. Podszus-Görlich TT200/37.

Bild 2.38d. KEF B139.

Bild 2.38e. Eton 8-480/32-hex.

Bild 2.38f. Harbeth LF 8 Mk III.

mung und Resonanzen schwingt. Damit ist eine sehr exakte Reproduktion möglich. Nachteilig ist hier nur der Blechkorb des Chassis. Er läßt bei über 13 cm Durchmesser etwas an Stabilität zu wünschen übrig. Man kann Abhilfe schaffen, indem der Korb mit weißem Klebstoff aus einer Klebepistole (und ruhiger Hand) verstärkt wird. Der Magnet ist nicht sehr groß, aber sehr kräftig, wodurch Q_{tc} sehr niedrig liegt. Bei aktiven Konzepten ist das unerheblich, aber bei passivem Einbau ist die Wiedergabe des Baßbereiches etwas schwach. Es gibt aber inzwischen spezielle Versionen mit höherem Q_{tc} und ansonsten unveränderten Parametern.

Die Styropor-Membran des Chassis in Bild 2.38d ist sehr stabil und ermöglicht sehr saubere Baßwiedergabe. Das Chassis sollte aber nicht bei Frequenzen über 400 Hz (Frequenzweiche mit 18 dB Steilheit) betrieben werden, da sich sonst störende Resonanzen bemerkbar machen. Da die bewegte Masse nicht gering und der Magnet nicht gerade besonders kräftig, die maximale Auslenkung aber recht groß ist, kann der effektive Wirkungsgrad nicht sehr hoch sein. Deshalb ist hierfür ein sehr kräftiger Verstärker erforderlich. (Es gibt allerdings ein deutsches Lautsprecherchassis, das in dieser Hinsicht noch schlechter abschneidet. Hier muß man bei den benötigten Verstärkern eher von Kraftwerken reden.)

Das Chassis (Bild 2.38e) zeigt einen anderen Weg, mit dem sehr stabile Membranen gebaut

werden können. Eine wabenförmige Struktur aus dämpfendem Hartschaum ist zwischen zwei Membranen aus hartem Kunststoff-Gewebe-Verbund angeordnet. Dieses sehr erfolgversprechende Verfahren, das etwas an Flugzeugbau erinnert, kann sehr gute Ergebnisse liefern, vorausgesetzt der Klebstoff hält. (Bei guten Chassis ist das der Fall, aber Vorsicht bei billigen Nachbauten.)

Erfahrungen der BBC-Lautsprecherforschung während der letzten Jahrzehnte verkörpert. Die Membran ist aus Polypropylen. Form, Stärke, Gummisicke, Schwingspulenträger usw. sind bis ins kleinste Detail aufeinander abgestimmt. Bei diesem Chassis sind die Nichtlinearitäten von Membranaufhängung und Antrieb so gut gegeneinander kompensiert, daß sehr große lineare Auslenkung, geringste Verzerrungen und ein relativ hoher Wirkungsgrad vorhanden sind. Bei der Entwicklung dieses Chassis standen die klanglichen Aspekte immer neben den verschiedensten Meßwerten (was Sie leicht hören können). Es ist somit eines der besten

38g



Bild 2.38g. Seas P21 REX DD.

Referenz-Chassis, wenn es darum geht, gute von weniger guten Chassis zu trennen.

Auch in Bild 2.38g ist ein Chassis mit Polypropylenmembran zu sehen, bei dem die Konstrukteure einen kleinen Trick angewandt haben. Die Schwingspule verfügt über zwei geschlossene Kupferringe, die am oberen und unteren Ende der Spule angebracht sind (Bild 2.39). Der Innenwiderstand R_{dc} dieser Ringe ist sehr niedrig (fast null), wodurch eine sehr hohe Gegeninduktion erzeugt wird, wenn einer der Ringe in den Luftspalt eintaucht. Diese Gegeninduktion bremst die Membranbewegung elektrisch ab (denken Sie an die Gleichung für R_{me}). Damit verhindert das Chassis selbsttätig zu große Membranauslenkungen, was beim Einbau in Baßreflex- oder Transmission-Line-Gehäuse ein guter Schutz vor mechanischer Überlastung ist. Gleichzeitig verringert diese Maßnahme jedoch die maximale lineare Auslenkung, da die Wirkung der Ringe bereits in einiger Entfernung vom Luftspalt einsetzt.

Bei diesen Chassis müssen sehr exakt auf das Chassis abgestimmte Gehäusekonstruktionen eingesetzt werden. Andernfalls ist die Box zwar hochbelastbar, aber nicht so ganz verzerrungsarm. (Halten Sie sich unbedingt an die Vorschläge des Herstellers.)

Eine Kunststoff-Membran hat das Chassis in Bild 2.39a (es ist Neoflex). Auch hier arbeiten die Konstrukteure mit einem kleinen Kunstgriff. Das Chassis verfügt über zwei identische

39

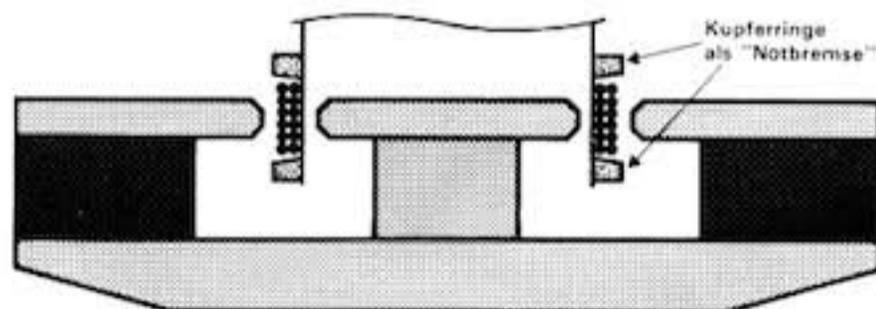


Bild 2.39. Eine magnetische Notbremse verhindert zu große Auslenkungen der Membran. Nicht zu verwechseln mit den verzerrungsmindernden Kurzschlußringen, die am Magneten oder am Polkern angebracht sind (und auch als Notbremse genutzt werden können).

39a



Schwingspulen, die unabhängig voneinander angesteuert werden können. Schaltet man im Baßbereich die zweite Spule parallel zu der ersten dazu, zieht das Chassis mehr Strom (Leistung) vom Verstärker und setzt diese in mehr Schallenergie um. Man preist das gerne als höheren Wirkungsgrad, aber das ist es im Grunde nicht.

Der Wirkungsgrad ist nur im Mitteltonbereich höher, als bei einem Chassis mit nur einer Spule, aber dafür wird er im Baßbereich durch die halbierte Impedanz deutlich schlechter (Bild 2.40). Der Vorteil dieser Konstruktion ist, daß der Hersteller eine leichtere Membran in einem kleinen Gehäuse einsetzen kann, ohne eine zu hohe Resonanzfrequenz in Kauf nehmen zu müssen. Gerade das ist bei 2-Wege Boxen nicht falsch, da die Membran zur Wiedergabe mittlerer Frequenzen nicht zu viel Massenträgheit ins Spiel bringen sollte.

Dieses Prinzip unterläuft ganz einfach den physikalischen Zusammenhang zwischen bewegter Masse, Federsteife (der Gehäuseluft

Bild 2.39a. Focal 7 N 402-DBE.

40a

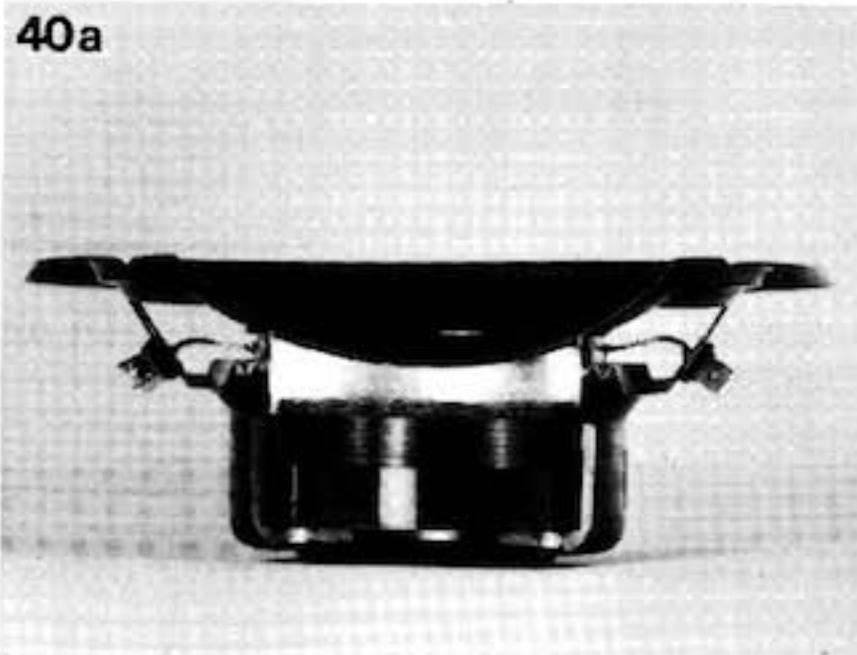
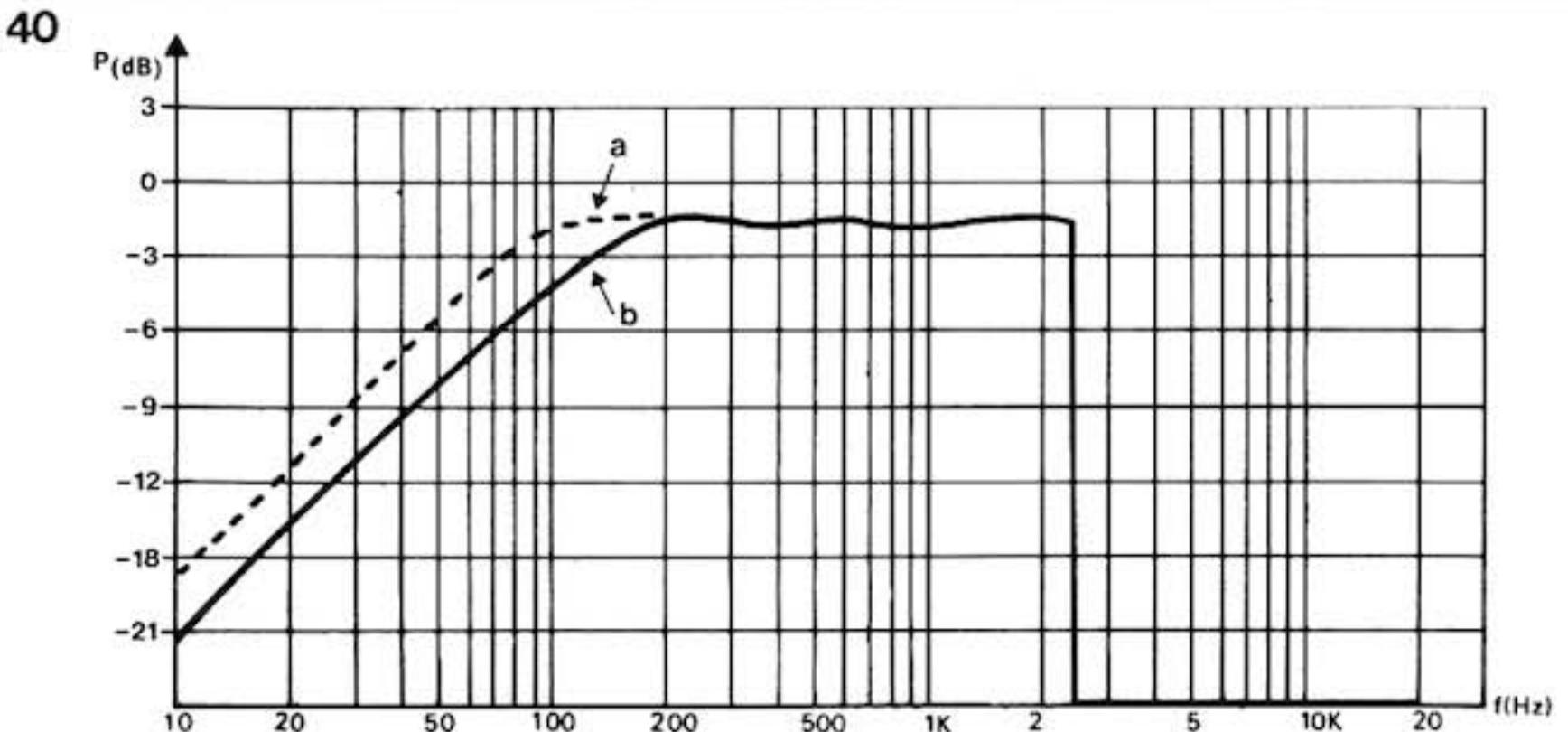


Bild 2.40. Kurve a zeigt den Frequenzgang eines Doppelspulenchassis, bei dem eine der Spulen zu höheren Frequenzen hin abgekoppelt ist. Ein Chassis mit gleichem Gehäusevolumen und Wirkungsgrad, jedoch nur einer Schwingspule, zeigt den Kurvenverlauf b.

Bild 2.40a. Dynaudio 17 W 75.



gegen die Membran) und der Bedämpfung Q_{tc} durch den Antrieb. Die Zusammenhänge haben auch etwas mit dem Wirkungsgrad zu tun, der wieder direkt etwas mit der Gehäusegröße. Wir werden das später noch genauer sehen. Vorerst genügt es zu wissen, daß das Gehäusevolumen gegenüber einem ähnlichen Chassis mit einer Spule halbiert werden kann, ohne die untere Grenzfrequenz zu erhöhen. Ein kleiner Hinweis zu diesen Doppelspulen-Chassis: Je nach Ansteuerung der zweiten Spule und nach Gehäuseprinzip kann die Impedanz deutlich unter 8 Ohm liegen. Auch wenn diese Chassis als 8-Ohm-Chassis verkauft werden, sind einige japanische Digitalendstufen damit nicht einverstanden und schalten ab, bevor Sie irgendetwas von den Boxen gehört haben. Wieder ein Grund, Lautsprecherboxen immer mit dem eigenen Verstärker zu testen.

Das Chassis in Bild 2.40a soll an dieser Stelle noch kurz erwähnt werden, weil es im Gegensatz zu fast allen anderen kleinen Mitteltiefen-chassis über eine geradezu gigantische Schwingspule mit 75 mm Durchmesser verfügt. Es ist fast ausgeschlossen, diese Chassis elektrisch zu überlasten, wodurch kleine Satellitenboxen auch für rauheren Einsatz konstruiert werden können. Voraussetzung ist, daß die mechanische Belastung durch ein vorgeschaltetes steilflankiges Filter gering bleibt. Die Membranen sind übrigens tropen- und wasserfest.

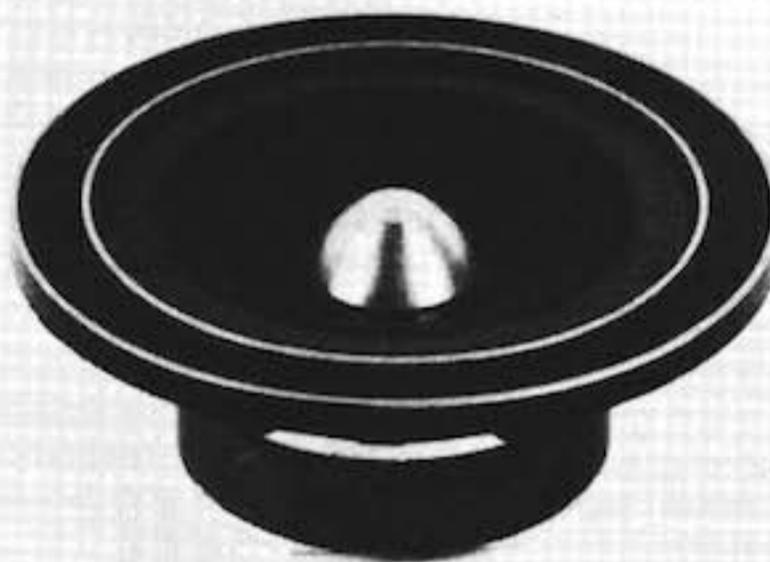
Das Chassis in Bild 2.40c hat eine Sandwich-Membran, die genügend innere Dämpfung aufweist, um auch im Mitteltonbereich noch resonanzfrei zu arbeiten. Die Vorteile dieser Membranmaterialien wurden bereits angesprochen. Im Unterschied zu anderen Herstellern wie Eton, Cabasse usw. setzt der Hersteller aber hier eine Vollkonusmembran ein. Bei diesem Membrantyp ist die Konusform bis ins Membranzentrum erhalten, was eine noch höhere Stabilität der Membran zur Folge hat. Grundsätzlich kann dadurch aber

Bild 2.40b. Ein Mitteltonchassis mit Dispersionskegel des französischen Herstellers Audax. Der Kegel verbessert das Abstrahlverhalten bei hohen Frequenzen. (Modell MHD 12 P 25 FSM-K).

Bild 2.40c. Podszus-Görlich MT130.

Bild 2.40d. Seas H 204.

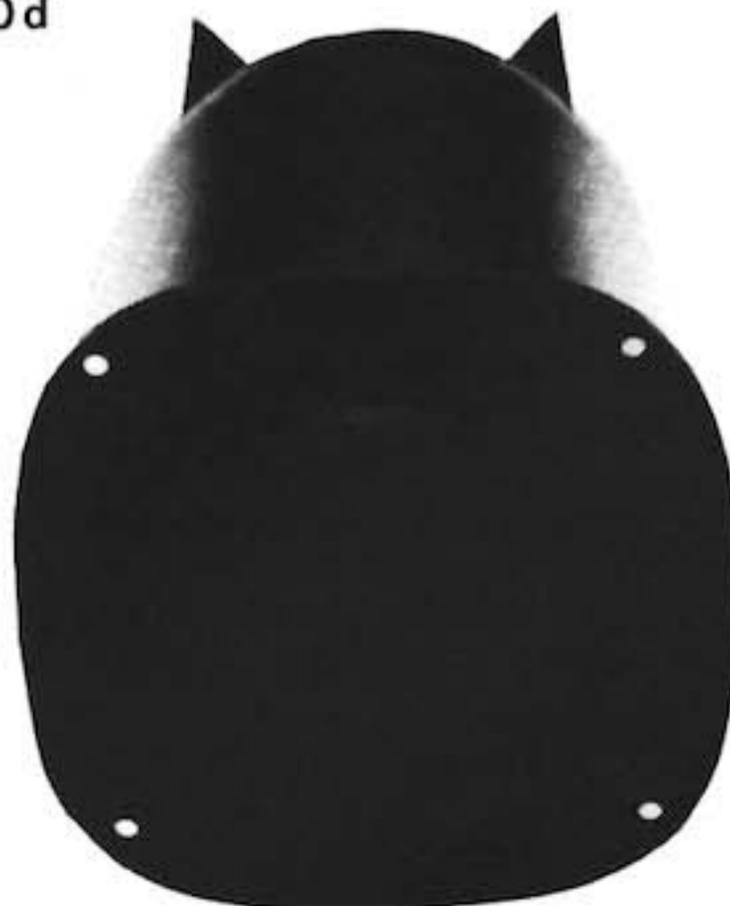
40b



40c



40d



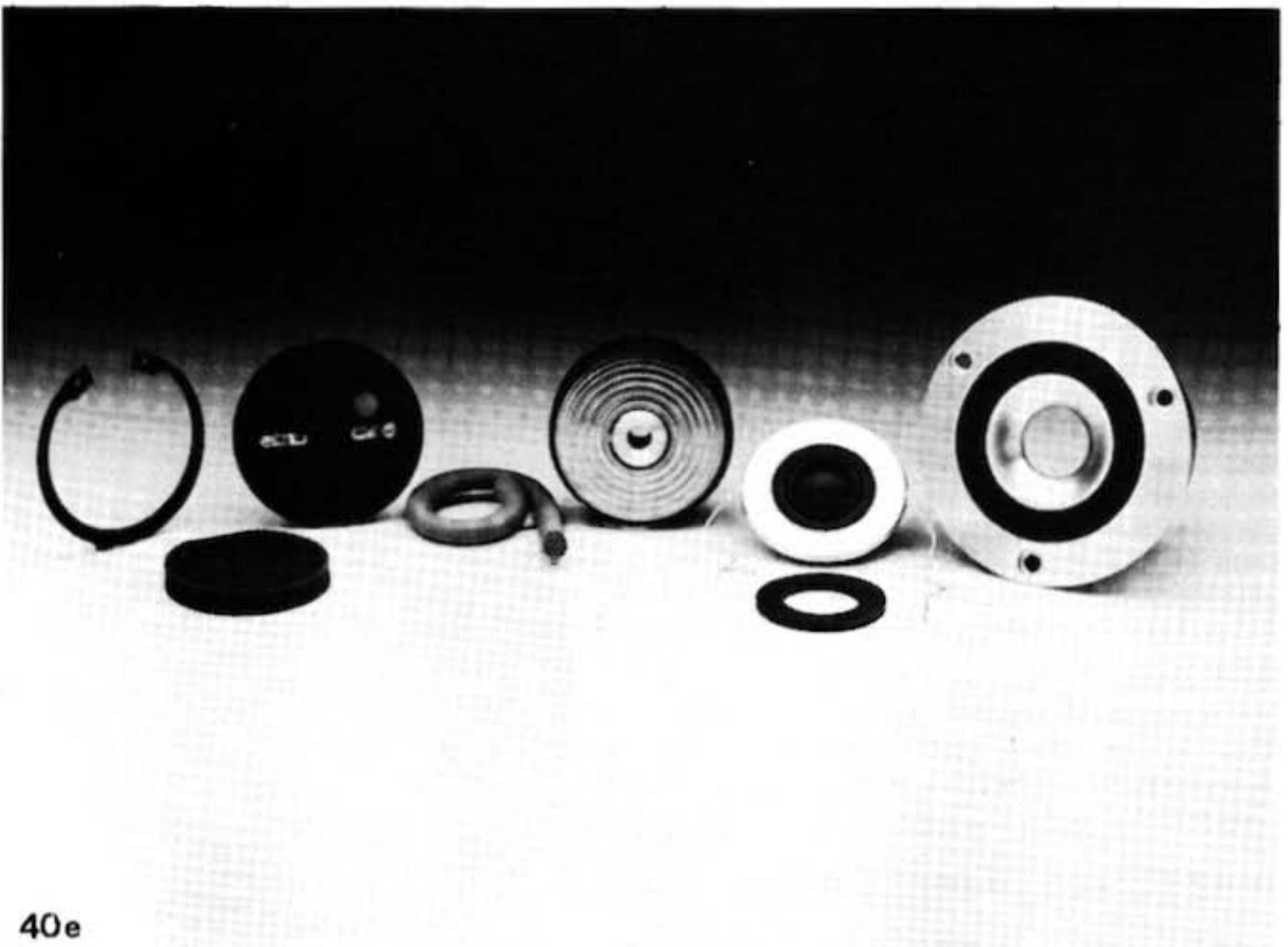
das Abstrahlverhalten einer Membran verschlechtert werden. Die unterschiedlichen Abdeckkalotten, die Sie bei Lautsprecherchassis finden, zeigen, daß es hier nicht nur um Staubschutz geht. Für den Hersteller bedeutet das zusätzlichen Aufwand, um für eine Vollkonusmembran die jeweils richtige Membrangeometrie zu finden. Leider schlägt sich dieser Aufwand bei kleinen Serien im Preis nieder. Neben Mitteltonchassis mit Konusmembran gibt es auch große Kalottenmitteltöner.

Obwohl gegen das Konstruktionsprinzip ebensowenig einzuwenden ist wie gegen Hochtonkalotten, haben sich diese Chassis aber nie so recht durchsetzen können. Das liegt vermutlich daran, daß die Membranaufhängung hier klanglich eine viel größere Rolle als bei der Konusmembran spielt. Das macht die Entwicklung und Fertigung sehr aufwendig, so daß es für viele Hersteller uninteressant ist. Bei dieser Bauart ist die Schwingspule immer außen am Membranrand angebracht, wodurch sehr viel Bewegungsenergie direkt in die Aufhängung abgegeben wird (etwas anders ist es nur bei nach innen gewölbten Kalotten mit kleineren

Spulen). Dabei sind die Resonanzen der Aufhängung geradezu programmiert. Vor ähnlichen Problemen stehen übrigens auch die Hersteller von Treibern für Mittelton-Hörner, obwohl die Membranbewegung dabei viel geringer und die Dämpfung durch den hohen Strahlungswiderstand größer ist. Der oft sehr unangenehme Klang billiger Treiber, der häufig den eingesetzten Metallhörnern untergeschoben wird, kommt zum großen Teil von diesen Resonanzen, die immer im oberen Teil des Übertragungsbereiches liegen. (Zu guten Treibern, bei denen nicht nur die Membran, sondern die Aufhängung gleich mit aus Titan gefertigt wird, kommen wir noch.)

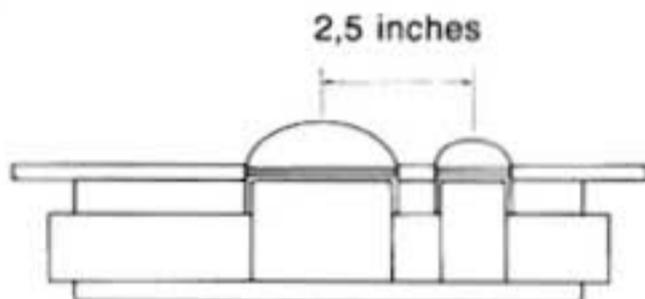
An diesem konventionell aufgebauten Hochtonchassis (konventionell hat hier nichts mit dem Klang zu tun) wird ein anderer Aspekt deutlich, der leider sehr häufig nur ein Pluspunkt für die Hersteller ist: Ferrofluid im Luftspalt. Ferrofluid ist eine flüssige und untrennbare Mischung (Emulsion) feinsten Metallstäube und spezieller Öle, die durch den

Bild 2.40e. Scan Speak D 2008



Metallanteil mit Magnetfeldern in einer bestimmten Position fixiert werden kann; zum Beispiel im Luftspalt eines Lautsprecherchassis. Die Werbung weist bei diesem Verfahren immer darauf hin, daß durch diese Füllung des Luftspaltes eine bessere Wärmeableitung und damit eine höhere Belastbarkeit für das Chassis zu realisieren ist. Das stimmt, auch wenn der Gewinn nicht allzu groß ist. Die in der Spule erzeugte Wärme wird zum größten Teil als Strahlungswärme abgegeben und nicht über die Luft zu benachbarten Metallteilen geleitet. Sonst wäre es mit der Belastbarkeit aller Chassis nicht sehr weit her. Aber etwas hilft es schon. Nur, es hilft auch dem Hersteller Magnetmaterial zu sparen, denn die Flüssigkeit im Luftspalt ist ein besserer Reibungswiderstand als Luft, den man zur Bedämpfung des Chassis einsetzen kann. Weiterhin haben diese Flüssigkeiten eine temperaturabhängige Viskosität, womit der Reibungswiderstand im Chassis ebenfalls temperaturabhängig wird. (Je heißer, desto weniger). Auch hier liegt es wieder am Hersteller, immer die richtige Menge des richtigen Ferrofluids einzubauen. Bei

40f



40g

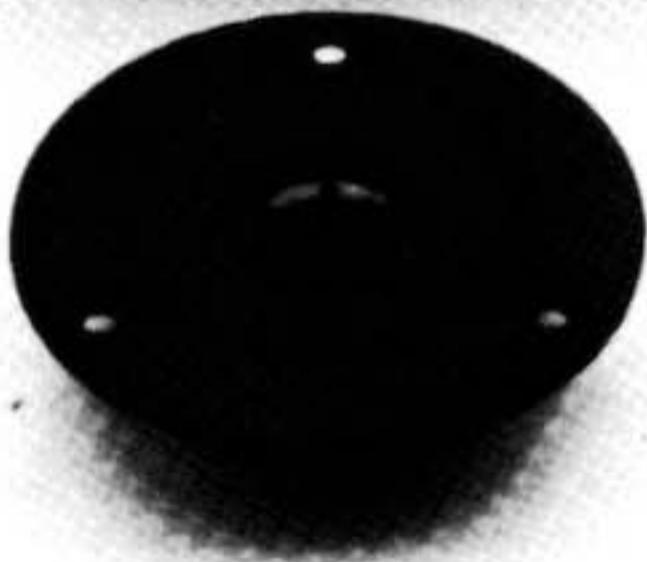


Bild 2.40f. Mittel-/Hochtonkombination des Studiomonitors SCF 6000 von RCF.

Bild 2.40g. Audax TW 74 A.

billigen Chassis sind diesbezügliche Zweifel gar nicht so falsch.

Neben einzelnen Chassis muß hier auch eine Kombination von Mittel- und Hochtonchassis erwähnt werden (Bild 2.40f). Bei dem neuen Studiomonitor SCF 6000, mit dem die italienische Firma RCF jetzt zum Wettbewerb gegen die etablierten Studiomonitore antritt, wurde ein neuer Weg zur Vermeidung von Interferenzen zwischen den einzelnen Chassis eingeschlagen. Mittelton- und Hochtonchassis teilen sich einen Magneten. So ist es möglich, die akustischen Zentren (die Membranen) sehr dicht nebeneinander anzuordnen.

Das Abstrahlverhalten einer solchen Konstruktion ist deutlich besser als bei konventioneller Anordnung zweier Chassis. Der nötige Aufwand ist aber auch etwas höher. Damit den Schwingspulen nicht zu wenig Magnetmaterial zur Verfügung steht, wurde ein Magnet verwendet, der gut zu einem großen Baßchassis passen würde. Die Magnetkonstruktion wiegt immerhin 7,5 kg, ein einzigartiger Wert für Mittel- und Hochtonchassis. Nur einige Treiber für Mitteltonhörner sind noch schwerer. Mit diesem Magneten wird eine Flußdichte von 1,6 Tesla in beiden Luftspalten erzeugt, so daß die Polplatten in der magnetischen Sättigung betrieben werden. Jede Fluß-Modulation sowie ein magnetisches Übersprechen der beiden Schwingspulen ist so ausgeschlossen. Das äußert sich in sehr niedrigen Verzerrungswerten.

Zum Schluß noch ein ganz kleines Tauchspulenchassis: Gewicht 52 Gramm, bewegte Masse 0,1 Gramm, 10,5 mm Schwingspule, Schalldruck über 91 dB/1W/1m. Ein preiswertes kleines Superhochtonchassis, mit dem einer gerichteten Abstrahlung höherer Frequenzen entgegengewirkt werden kann (auch bei nachträglichem Einbau in vorhandene Boxen).

Es gibt natürlich noch weitaus mehr interessante Chassis, die fairerweise erwähnt werden sollten, aber dafür fehlt hier einfach der Platz. Die vorgestellten Chassis sollten nur interessante Aspekte der dynamischen Tauchspulenzwandler aufzeigen. Zum Thema Schwingspulen abschließend noch eine sehr interessante Idee. Es werden zwei verschiedene Spulen eingesetzt (Bild 2.41).

Eine Spule ist relativ lang, damit sind im Mitteltonbereich ein hohes BI-Produkt und hoher Wirkungsgrad möglich. Bei tieferen Frequen-

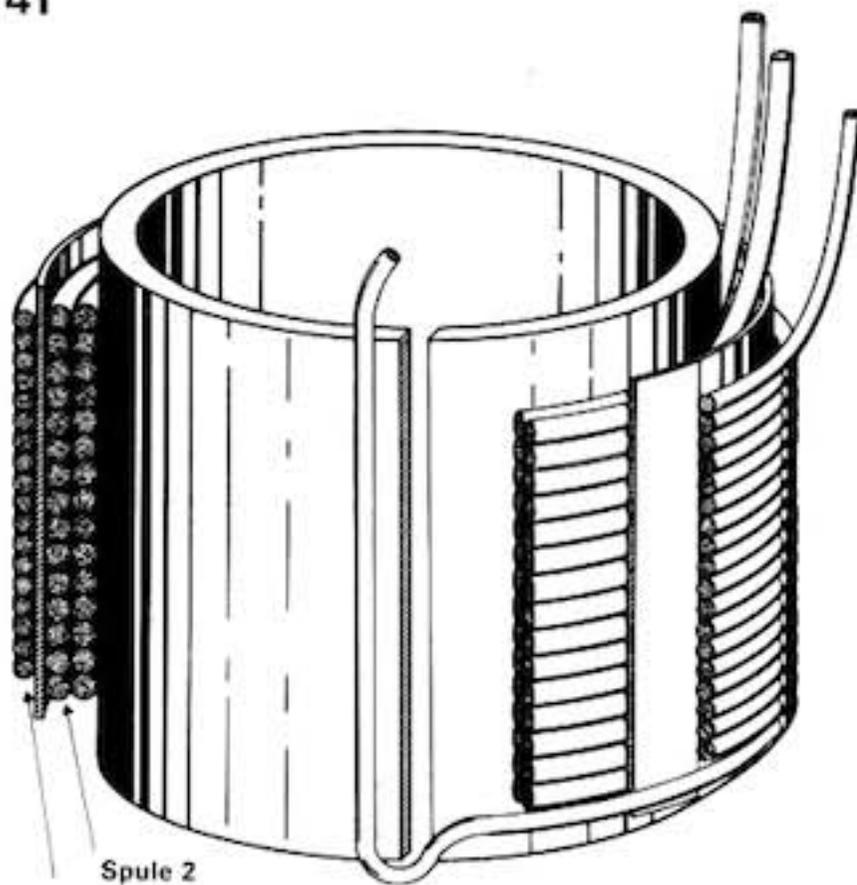


Bild 2.41. Eine Doppelschwingspule besteht aus zwei Wicklungen, die unterschiedlich lang sind und einen unterschiedlichen Drahtdurchmesser haben können.

zen wird diese Spule von einer Frequenzweiche (Bild 2.42a) ausgeblendet und eine kürzere Spule übernimmt die Arbeit. Das BI-Produkt ist jetzt deutlich geringer, ebenso die Bremswirkung der Gegeninduktion des Antriebes (Bild 2.42b).

Nach diesem Prinzip arbeitet der Watkins-Woofer, der in einigen Boxen der Firma Infinity eingebaut ist. Hier können Sie in die Gesetze der Lautsprechertechnik (nicht in die Physik derselben) eingreifen, und nach Belieben hohen Wirkungsgrad, niedrige Grenzfrequenz, kleine Gehäuse und zulässige minimale Impedanz miteinander kombinieren. Das ist etwas für Tüftler, die sich ihre Chassis bei kleinen Herstellern sowieso nach Maß fertigen lassen. Die entsprechenden Kurven sind in Bild 2.43 gezeigt.

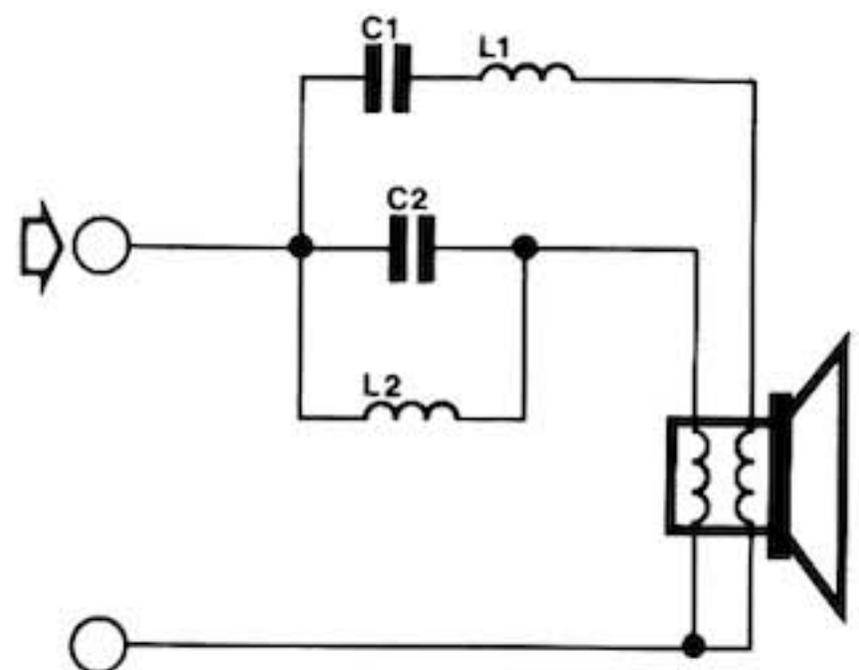
Hier gilt: Intelligenz statt dicker Magnete ist gut, aber Intelligenz und dicke Magnete ist besser.

Wer ausreichend dimensionierte Verstärker besitzt, der wird sich über schlechten Wirkungsgrad von Lautsprecherboxen keine großen Sorgen machen. Das ist leider nicht ganz richtig, denn wenn immer der 10-fache Strom durch die Schwingspule fließt, so wird diese

deutlich wärmer als die eines Chassis mit höherem Wirkungsgrad. Sie ändert dadurch ihren Widerstand und begrenzt so den Strom für eine gegebene Spannung am Verstärkerausgang. Das Chassis liefert dann bei 10 W eine Schalleistung von 95 dB, für 100 W sind es 104 dB und für 200 W nur noch 105 dB statt 108 dB. Laute Passagen werden dann nur noch mit halber Dynamik reproduziert, was die Nachbarn sicherlich mehr freut als Sie.

Bei Aktivboxen ist hier besondere Vorsicht angebracht. Es kommt oft vor, daß durch die einfache Möglichkeit der Pegelkorrektur Chassis mit sehr unterschiedlichem Wirkungsgrad kombiniert werden. Die Box klingt dann immer nur kalt oder warm richtig, da ein Chassis bei der Wiedergabe immer weit mehr belastet wird als das andere. Bild 2.44 zeigt den Frequenzgang für kalte und warme Mitteltonchassis.

42a



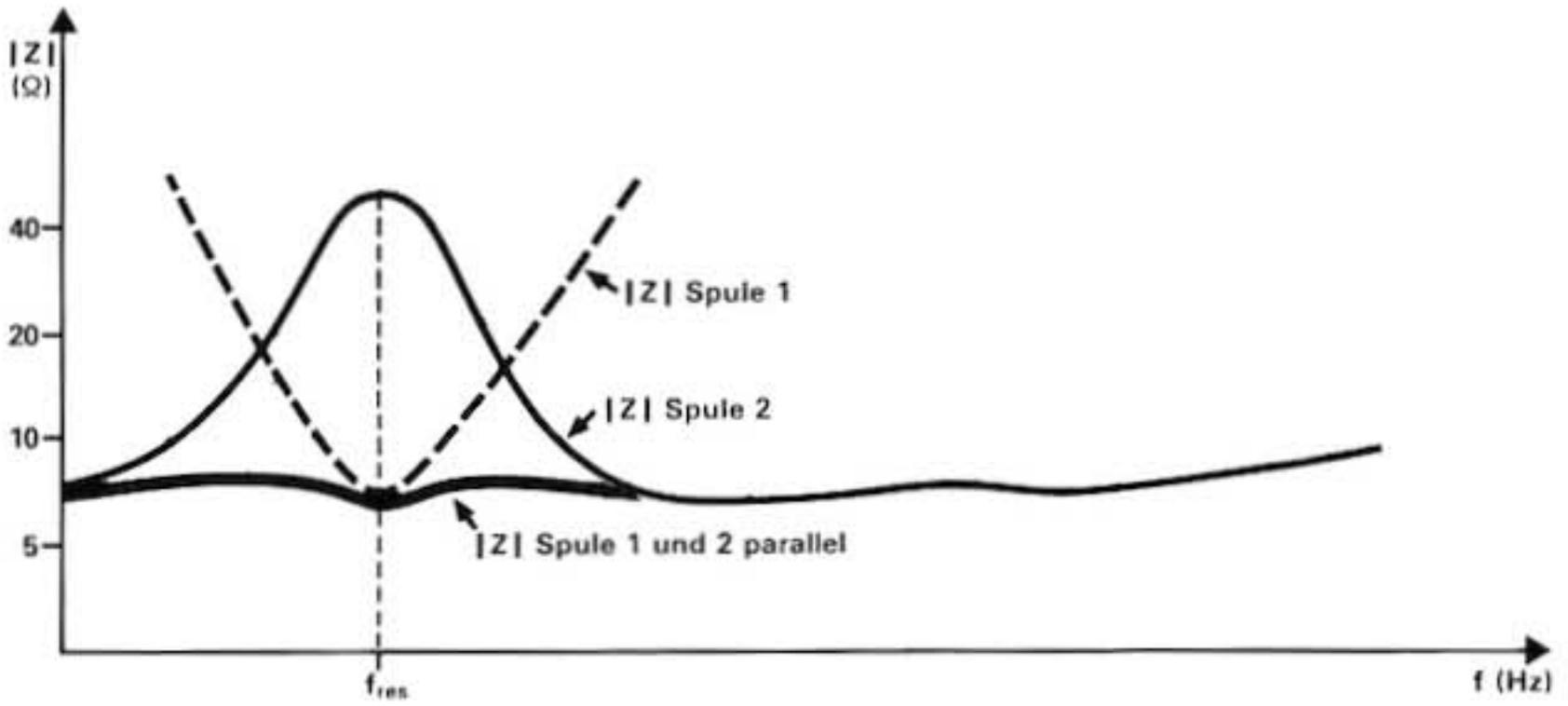
86902-2-42a

Bild 2.42. Ansteuerung und Impedanzverlauf beim Watkins-Woofer.

Bild 2.43a. Impedanzkurven einer mechanisch gebremsten Box b, und einer Box nach dem Watkins-Prinzip a.

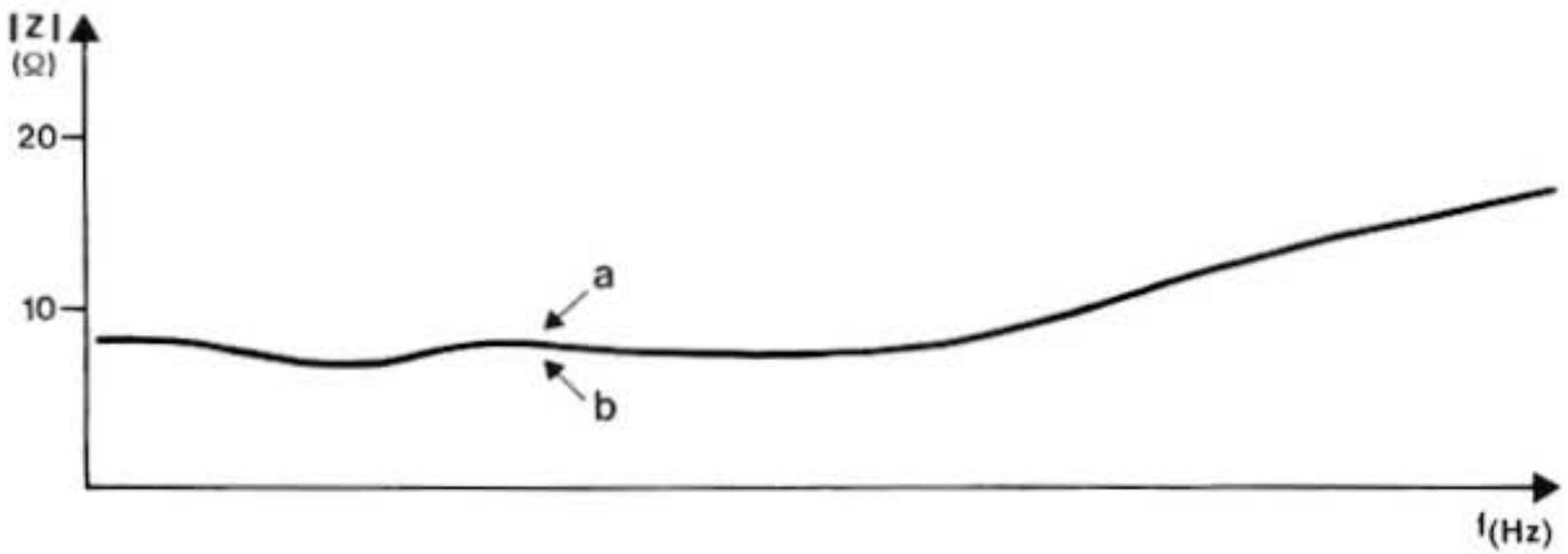
Bild 2.43b. Schalldruckverlauf und Wirkungsgrad der zwei verschiedenen LS-Boxen bei gleichem Gehäusevolumen Watkins-Prinzip (a) und (b) eine mechanisch gebremste Box.

42b

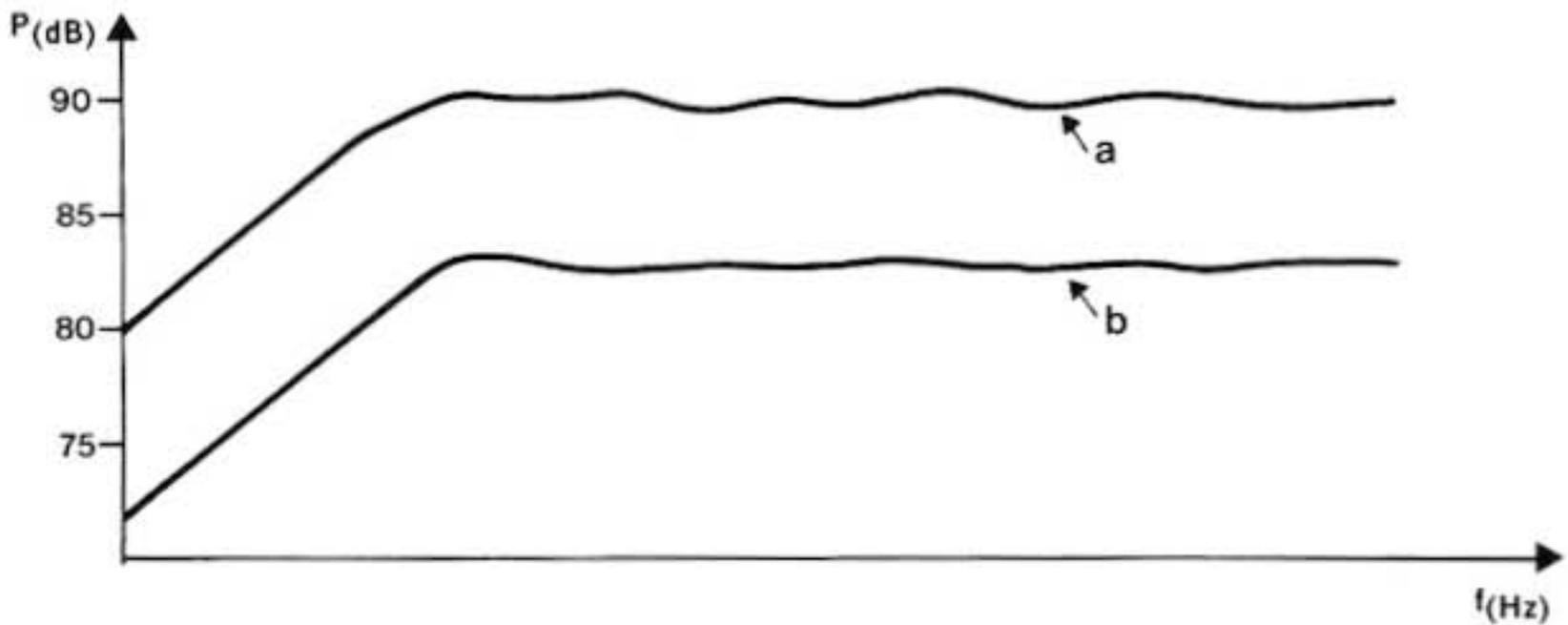


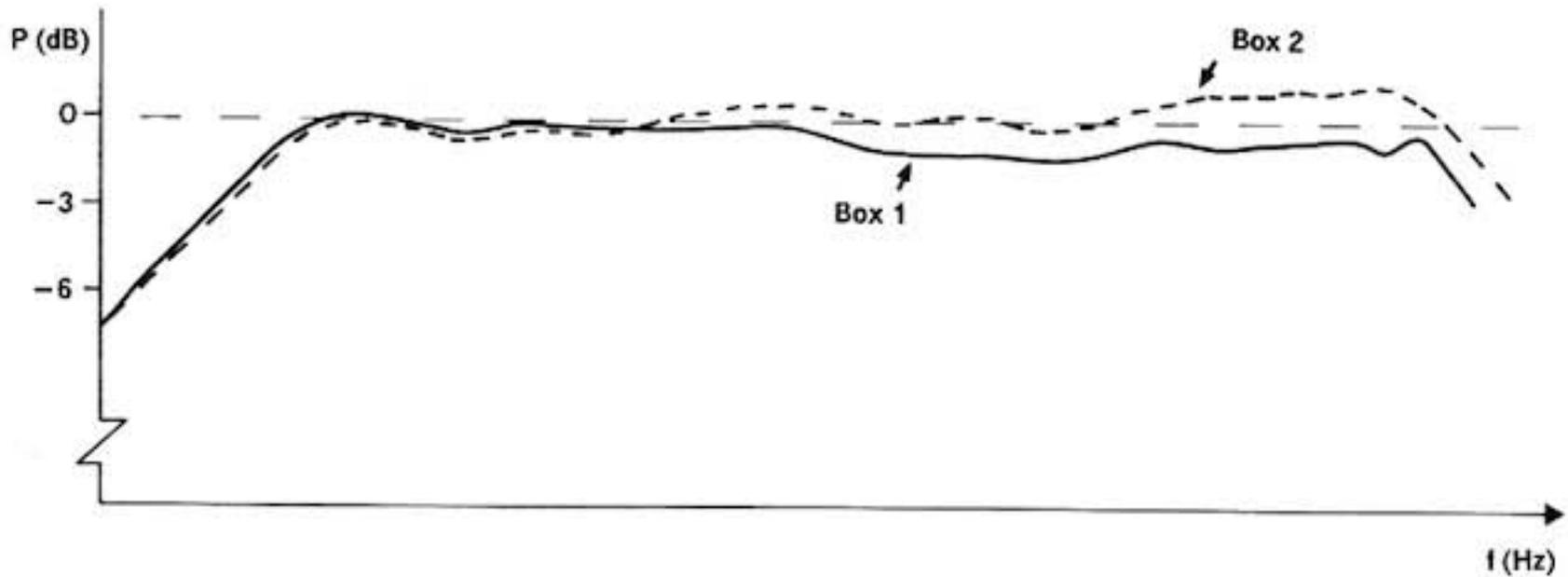
86902-2-42b

43a



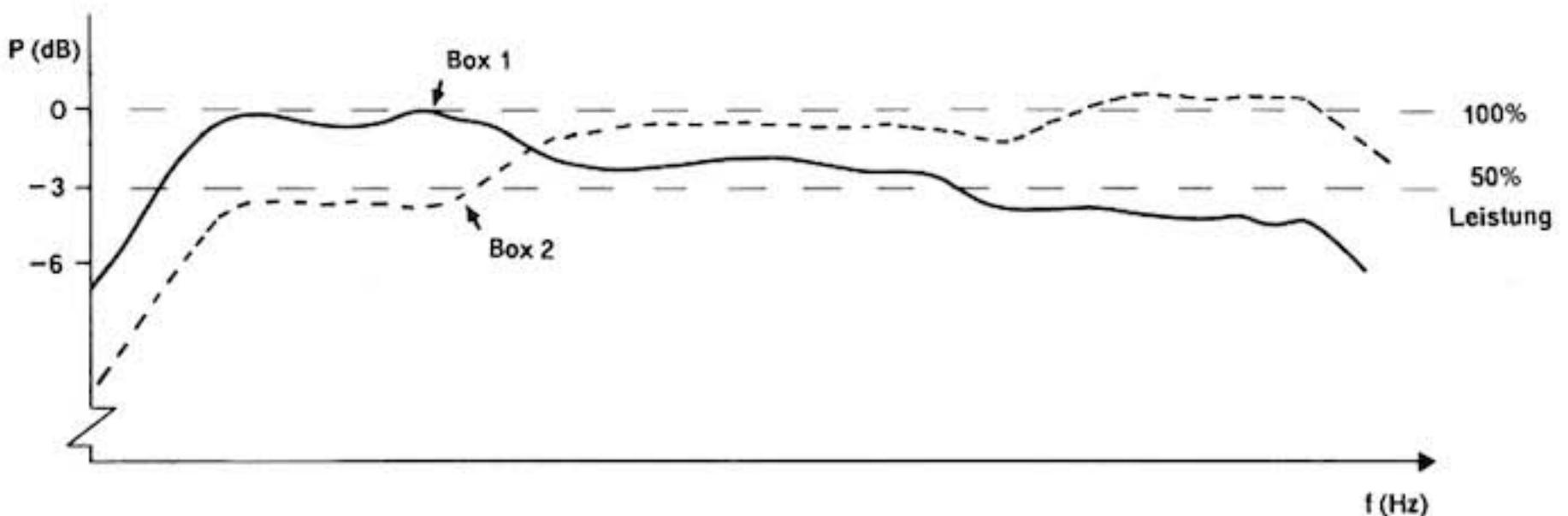
b





86902-2-44a

b



86902-2-44b

Bild 2.44. Wiedergabekurven einer Aktiv-Box, bei der Chassis mit sehr unterschiedlichem Wirkungsgrad verwendet wurden. Obere Kurve: Wiedergabekurve mit normalem (kaltem) Widerstand der Schwingspulen unmittelbar nach dem Einschalten.

Untere Kurve: Mitten in Verdi's Requiem. Nach einer lautereren Passage erwärmen sich die Schwingspulen unterschiedlich, die Folge ist eine frequenzabhängige Dy-

namikkompression. Hat das Tieftonchassis den höchsten Wirkungsgrad, so wird sich die Wiedergabekurve so verbiegen, wie die durchgezogene Linie in b zeigt. Das Klangbild wird dumpf.

Hat dagegen das Hochtonchassis den höchsten Wirkungsgrad, so wird der Baßbereich relativ leiser. Das entspricht zwar mehr der Hörphysiologie (Loudness-Charakteristik), sollte aber auch nicht übertrieben werden.

Kapitel 3

Theorie von dynamischen Lautsprecherchassis und Frequenzweichen

Nachdem jetzt die Bestandteile dynamischer Lautsprecherchassis bekannt sind, ist etwas Theorie angebracht. Es gibt unzählige Lautsprecherchassis, die sich alle etwas voneinander unterscheiden. Wollen Sie z.B. aus der Vielzahl der angebotenen Chassis bestimmte Typen kombinieren, die Baßwiedergabe oder Frequenzweichen vorhandener Boxen verändern, vorhandene Boxen durch spezielle Subwoofer oder Hochtöner erweitern, dann müssen Sie etwas rechnen.

Alle Lautsprecherchassis, bei denen die Elemente Masse und Feder vorhanden sind, haben die Übertragungsfunktion von einem Hochpaß-Filter zweiter Ordnung. Bei höheren Frequenzen kann die Induktivität der Schwingspule eine Verringerung der Schallabstrahlung bewirken, die resultierende Übertragungsfunktion ist die eines Tiefpaß-Filters erster Ordnung. In Verbindung mit der Massenträgheit der Membran kann hier auch ein Tiefpaß-Filter 2ter Ordnung entstehen. Diese Übertragungsfunktion ist immer im Spiel! Dabei spielt es keine Rolle, ob eine Frequenzweiche, ein Lautsprechergehäuse oder ein elektronisches Filter für eine Baßentzerrung dimensioniert wird. In allen Fällen addiert sich die Übertragungsfunktion des Chassis zu den beabsichtigten Aktivitäten. Dabei ist es nicht selten, daß sich hier einige Dinge nicht besonders gut miteinander vertragen.

Leider sehen Berechnungen mit Übertragungsfunktionen immer sehr abschreckend mathematisch aus, so daß in der einschlägigen Hobby-Literatur nicht viel dazu zu finden ist. Statt dessen finden Sie Tabellen aller Art, mit deren Hilfe Sie Frequenzweichen, Gehäuse usw. konstruieren sollen. Anschließend wundern Sie sich vielleicht, wieso alles nicht so recht klappen will. Erklärungen dazu finden Sie in der Literatur aber nicht.

Es hat seinen Sinn, es einmal anders zu versuchen. Im Zeitalter der Microcomputer ist Mathematik nicht mehr das einzige Werkzeug,

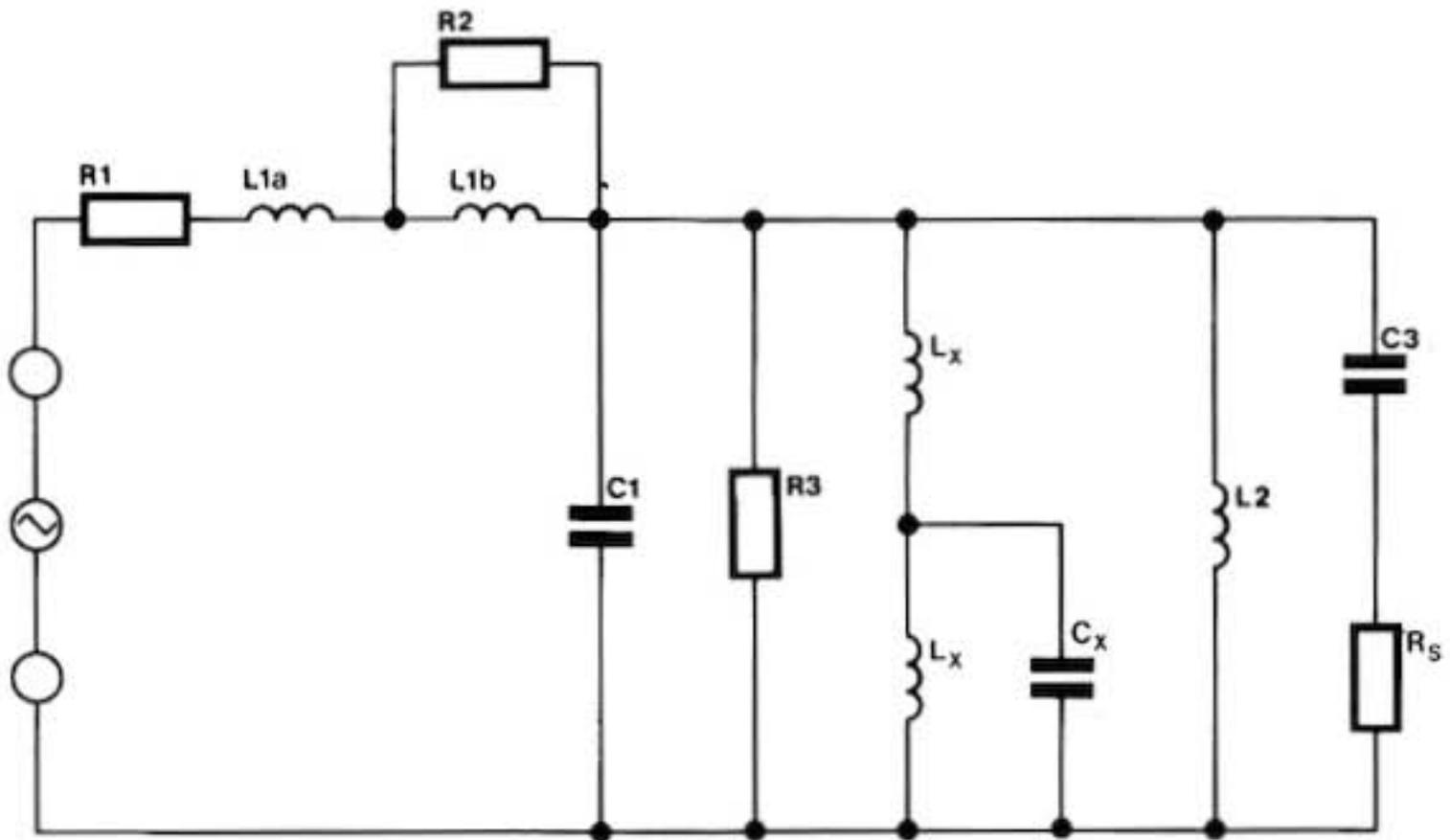
mit dem Sie solche komplexen Netzwerke wie Lautsprecher und Frequenzweichen in Kombination berechnen können. Es gibt Programme, die Sie hier vom mathematischen Ballast befreien; Sie lassen rechnen. Dabei brauchen Sie noch nicht einmal die notwendigen Gleichungen zu kennen. Sie geben einfach Werte für Elektronikbauteile in einen Schaltplan ein. Der Rechner übernimmt dann die weitere Arbeit. Er berechnet die Übertragungsfunktion, zeigt das Amplituden- oder Phasenverhalten, die Impulswiedergabe usw. (je nach Komplexität des Programmes) auf dem Monitor. Auch wenn Sie keinen Kleinrechner besitzen und ihn auch nirgendwo leihen können, sollten Sie die folgenden Seiten lesen. Sie tragen (hoffentlich) dazu bei, die oft recht komplexen Vorgänge rund um die Lautsprecher und die in diesem Zusammenhang veröffentlichten Tabellen besser zu verstehen.

Ersatzschaltbilder und mathematische Zusammenhänge

Um alle Teile eines Lautsprecherchassis oder irgendeiner Lautsprecherbox rechnerfreundlich zu gestalten, sind Ersatzschaltbilder notwendig. In dem Ersatzschaltbild werden alle mechanischen Teile in analoge elektrische Bauteile umgewandelt. Sie lassen sich dann zusammen mit anderen elektrischen Bauteilen leicht berechnen. Ein solches Ersatzschaltbild ist in Bild 3.1 dargestellt.

Die einzelnen Bauteilbezeichnungen haben folgende Bedeutung:

R1	= Gleichstromwiderstand R_{dc} der Schwingspule	Ohm
L1	= Induktivität der Schwingspule	Henry
R2	= Wirbelstromdämpfung der Schwingspule	Ohm



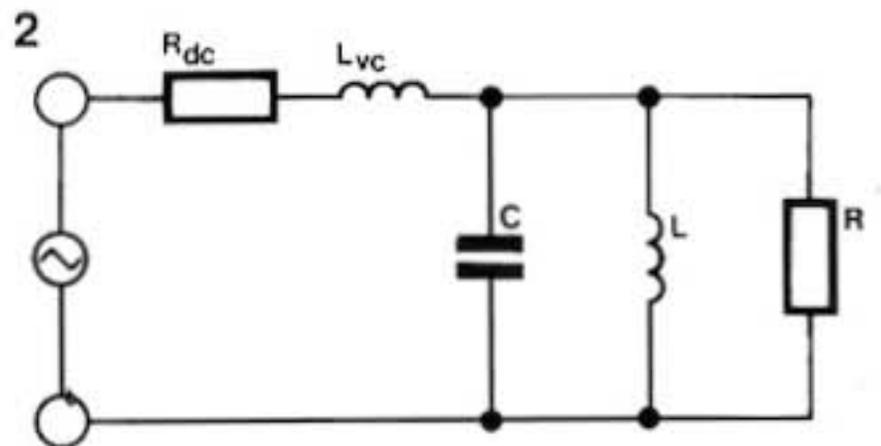
86902-3-1

Bild 3.1. Das Ersatzschaltbild eines normalen dynamischen Lautsprecherchassis.

R3	= mechanische Reibung des Systems	Ohm
C1	= bewegte Masse ohne Federwirkung	Farad
L2	= Feder ohne Masseeinfluß	Henry
Lx	= Feder mit Massewirkung	Henry
Cx	= Masse mit Federwirkung	Farad
C3	= mitschwingende Luftmasse (frequenzabhängig)	Farad
Rs	= Strahlungswiderstand der Membranfläche	Ohm

Die Ersatzschaltung aus Bild 3.1 ist noch nicht ganz so anwenderfreundlich wie es eigentlich sein sollte. Bestimmte Bauteilwerte lassen sich nicht so einfach am Chassis messen; z.B. die Elemente mit Masse- und Federwirkung (Membranaufhängung). Hier hilft eine Vereinfachung; es werden einfach einige Bauteile zusammengefaßt (Bild 3.2).

In das vereinfachte Ersatzschaltbild lassen sich jetzt die Herstellerdaten (oder besser selbst gemessene Werte) ohne Probleme eingeben. Wie Sie die Werte für Q_s , Q_m und Q_t messen, wissen Sie möglicherweise bereits. Wenn nicht, dann finden Sie im letzten Kapitel die notwendigen Informationen über Messungen an Lautsprecherchassis und Boxen. Wir unter-



86902-3-2

Bild 3.2. Ein vereinfachtes Ersatzschaltbild.

scheiden dabei zwischen den Daten für Chassis alleine, diese sind mit dem Index s versehen und den Daten für eingebaute Chassis, die mit dem Index c gekennzeichnet sind; z.B. f_s , f_c , Q_{ts} , Q_{tc} usw. (das s steht für Speaker und das c für Case, womit ein beliebiger Einbaufall gemeint ist).

Die gesamte bewegte Masse ermitteln Sie über ein Zusatzgewicht G (abgewogene Plastilinmasse z.B.). Durch die Zusatzmasse verringert sich die Resonanzfrequenz des Chassis, und aus dem Unterschied der Resonanzfrequenzen kann die bewegte Masse des Chassis berechnet werden. Mit der alten und neuen Resonanzfrequenz f_s und f'_s gilt:

$$M_{md} = \frac{G}{\frac{f_s^2}{f'_s{}^2} - 1}$$

G = Zusatzmasse in kg

M_{md} = bewegte Masse des Chassis in kg

f_s = Resonanzfrequenz des Chassis

f'_s = Resonanzfrequenz mit Zusatzmasse

Die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung ergibt sich aus:

$$C_{ms} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_s^2 \cdot M_{md}}$$

C_{ms} = Nachgiebigkeit in m/N

Auch das BI-Produkt kann mit Zusatzmasse ermittelt werden. Ordnet man die Membran waagrecht an und belastet sie mit einem Gewicht G, drückt das Gewicht die Membran nach unten. Ein Gleichstrom der Stärke i_0 bewegt die Membran bei richtiger Polung wieder in die Ruhelage ohne Gewicht:

$$BI = \frac{G \cdot g}{i_0}$$

G = Zusatzmasse in kg

g = Erdbeschleunigung 9,81 m/s²

i_0 = Stromstärke für die Kompensation der Membranauslenkung durch G in Ampere

Etwas schwieriger wird es mit der Spuleninduktivität L_{vc} . Sie ist nur zu ermitteln, wenn Sie eine Impedanzkurve mit blockierter Membran aufnehmen (um die Einflüsse der Massenträgheit auszuschalten) und die Induktivität aus dem Impedanzanstieg berechnen. (Der einfachste Weg ist es, Chassis einzusetzen, von denen konkrete und richtige Herstellerdaten vorliegen, auf die Sie zusätzlich zu den persönlichen Messungen zurückgreifen können.)

Der Widerstand R_{dc} liegt in Reihe zu den übrigen Bestandteilen. Er bestimmt wesentlich die Dämpfung des Systems (wirksame Reibungswiderstände wie Variovents oder Dämmstoff werden erst mit dem Gehäuse in die Rechnung gebracht. Der Widerstand R_{dc} ist unvermeidlich, er resultiert aus der Drahtlänge l, die für das BI-Produkt benötigt wird. Andere elektrische Widerstände, die in Reihe vorgeschaltet werden, verschlechtern die Bedämpfung des Schwingkreises aus Membranmasse und Federsteife der Membranaufhängung; daher sollten sie ebenso wie R_{dc} nicht allzu groß werden.

$$Q_e = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{\frac{(BI)^2}{R_{dc}}}$$

oder

$$Q_e = R_{dc} \cdot \sqrt{\frac{M_{md}}{\frac{(BI)^2}{C_{ms} \cdot (BI)^2}}}$$

Q_e = elektrische Güte des Schwingkreises (1/Bedämpfung)

BI = Wandlerkonstante in N/A

R_{dc} = Gleichstromwiderstand der Schwing-spule in Ohm

Eine Verdopplung von R_{dc} (z.B. durch dünne Zuleitungskabel) halbiert die Güte Q_e ; drastischer gesagt, Sie werfen teures Magnetmaterial aus dem Fenster. Selbst Widerstandswerte um 2 Ohm können deutlich hörbare Einflüsse haben, da sie frequenzabhängig wirken. Dazu ein kurzes Beispiel:

$$Q'_e = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{\frac{(BI)^2}{R_{dc} + R}}$$

R = zusätzlicher Widerstand in Ohm

Der Gleichstromwiderstand R_{dc} hat einen Wert von 6 Ohm; die Güte Q_e hat den Wert 0,7. Wird bei diesen Verhältnissen ein Widerstand Rx von 2 Ohm in die Zuleitung gelegt, ändert sich Q_e auf $Q'_e = 0,93$. Je nach Verhältnis von Q_e zu Q_m wird dadurch der Baßbereich gegenüber dem Mitteltonbereich bis zu 2,4 dB lauter. Die Absenkung der Lautstärke über den Spannungsteiler R/Z (Z = Impedanz des Chassis) ist frequenzabhängig, denn die Impedanz Z ist im Baßbereich anders als im Mitteltonbereich. Im Baßbereich hat das Chassis eine hohe Impedanz (z.B. 25 Ohm); die Absenkung beträgt dann 0,7 dB. Im Mitteltonbereich, wo die Impedanz fast mit R_{dc} identisch ist, liegt die Absenkung bei 2,5 dB. Im ungünstigsten Fall liegt der Baßbereich also 4,2 dB über dem Mitteltonbereich. Das ist mehr als eine Verdopplung der Leistung bei der Baßwiedergabe. Wer möchte kann das Beispiel noch einmal mit einem Wert von 1 Ohm für R durchrechnen. Damit ergeben sich folgende Verhältnisse:

$$Q'_e = Q_e \cdot \frac{7}{6}$$

Baßanhebung durch Q_e/Q'_e in dB =

$$20 \log \frac{7}{6} = +1,34 \text{ dB}$$

Dämpfung im Baß ($Z_{\max} = 25 \text{ Ohm}$) =

$$20 \log \frac{25}{26} = -0,34 \text{ dB}$$

Dämpfung im Mitteltonbereich ($Z_{\text{mt}} =$

$$6 \text{ Ohm}) = 20 \log \frac{7}{6} - 1,34 \text{ dB}$$

Der Baßbereich ist so gegenüber dem Mitteltonbereich um +2,34 dB angehoben.

Das sind immerhin 2,3 dB; also fast die doppelte Leistung im Baßbereich. Sowa ist hörbar, besonders, wenn im direkten Vergleich von einem dünnen Kabel auf ein dickeres Kabel mit deutlich geringerem Widerstand umgeschaltet wird. Durch die jetzt resultierende Anhebung des Mitteltonbereiches klingt die Box räumlicher und detaillierter. Welche der Schalldruckkurven jetzt linearer war, ist aber eine andere Sache. Sie wissen, das Gehör benötigt eine Zeit, um sich zu kalibrieren und fällt so immer auf scheinbar detailliertere Wiedergabe herein. Erst nach einiger Zeit läßt sich beurteilen, ob die Wiedergabe nicht etwas zu detailliert ist.

Man kann ja auch bei der Berechnung einer Box den Einfluß dünner Kabel einkalkulieren und für Q_e einen niedrigeren Wert ansetzen. Es ist jedoch sinnvoller, die Widerstände in der Zuleitung gering zu halten; das gilt natürlich auch für Frequenzweichenbauteile. Dabei muß es nicht immer 4 mm² Draht sein, 1,5 bis 2 mm² Durchmesser sind ausreichend.

Logischerweise ändert sich bei mechanisch gebremsten Chassis sehr viel weniger. Die Bedämpfung des Systems wird über R_m und Q_m wesentlich mitbestimmt. Beispielsweise gilt für $Q_e = 1,41$ und $Q_m = 1,41$:

$$Q_t = \frac{Q_e \cdot Q_m}{Q_e + Q_m}; \text{ z.B. } \frac{1,41 \cdot 1,41}{1,41 + 1,41} = 0,705$$

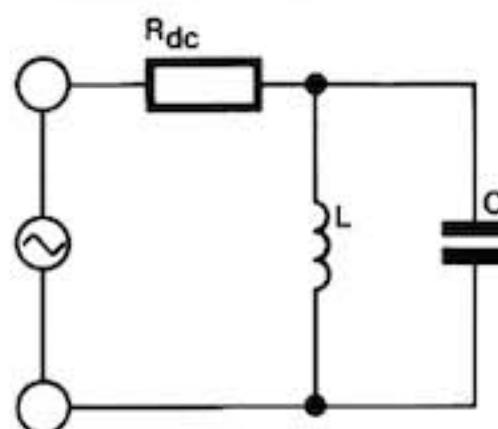
Wird Q_e durch einen Vorwiderstand größer, z.B. $Q_e = 1,85$, wird

$$Q_t = \frac{1,85 \cdot 1,41}{1,85 + 1,41} = 0,800$$

Auch die Impedanzüberhöhung einer solchen Box ist geringer als bei einer hauptsächlich mechanisch bedämpften Version. Damit wirkt

der Spannungsteiler aus Chassis und Vorwiderstand weniger frequenzabhängig. Sie sollten sich den Zusammenhang von elektrischer und mechanischer Güte immer vor Augen halten, wenn Sie Berechnungen an Lautsprechern und Gehäusen anstellen. Aber lassen Sie sich nicht zu sehr irritieren. Der sinnvollste Weg ist es, erst nur mit Q_e zu rechnen und Q_m später als Korrekturfaktor einzusetzen. Nach dieser Methode vereinfacht sich das Ersatzschaltbild zu einem einfachen RCL-Netzwerk (Bild 3.3).

3



86902-3-3

C = bewegte Masse
L = 1/Federsteife

Bild 3.3. Das vereinfachte Ersatzschaltbild aus Bild 3.2 weiter vereinfacht.

Das Ersatzschaltbild läßt erkennen, wie zum einen eine Änderung der bewegten Masse auf das System wirkt und zum anderen ein geschlossenes Gehäuse, das die Federsteife der Membranaufhängung unterstützt. Ein Gehäuse verändert die Spule L im Ersatzschaltbild, da diese die Nachgiebigkeit C_{ms} (1/Federsteife) der Membranaufhängung repräsentiert.

Federsteife-Chassis + Federsteife-Gehäuse = System-Federsteife

$$C_{\text{system}} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ms}} + \frac{1}{C_{\text{box}}}}$$

C_{ms} = Nachgiebigkeit der Membranaufhängung m/N

C_{box} = Nachgiebigkeit der Gehäuseluft für S_d m/N

S_d = Membranfläche m²

Da die Membranfläche hier eine Rolle spielt, definieren wir eine neue Nachgiebigkeit der Membranaufhängung, ein Luftvolumen V_{as} :

$$V_{as} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{ms} \cdot S_d^2$$

ρ = Luftdichte 1,19 kg/m³

c = Schallgeschwindigkeit 344,4 m/s

Der Wert für V_{as} ergibt das Luftvolumen, das gegenüber der Membranfläche S_d die gleiche Nachgiebigkeit aufweist, wie die Membranaufhängung.

Die Wirkung eines Gehäuses errechnet sich nach der Formel:

$$C_{system} = \frac{C_{ms}}{\frac{V_{as}}{V_{box}} + 1}$$

Ebenso wie das Verhältnis von C_{system}/C_{ms} ändert sich L im Ersatzschaltbild. Eine größere Masse würde den Kondensator C vergrößern. Dabei verhält sich die Kapazität von C proportional zur bewegten Masse M .

Übertragungsfunktionen

Die Übertragungsfunktion eines solchen Netzwerkes ist die eines Hochpasses 2ter Ordnung und kann auf verschiedene Weise geschrieben werden, je nach dem, wonach wir suchen.

Die abgestrahlte akustische Leistung P_{ak} für eine gegebene Eingangsleistung errechnet sich beispielsweise so:

$$P_{ak} = P_{el} \cdot \eta \cdot \left| \frac{-s^2}{1 + \frac{js}{Q_{tc}} - s^2} \right|^2$$

P_{ak} = akustische Leistung

P_{el} = elektrische Leistung

η = Wirkungsgrad

s = normierte Frequenz

$j = \sqrt{-1}$

$$s = \frac{2\pi \cdot f}{2\pi \cdot f_c}$$

Eine andere Formel definiert das Verhältnis vom Strom am Kondensator C (das ist die Kraft, die auf die bewegte Masse einwirkt) und der Eingangsspannung:

$$Y_c = \frac{1}{R} \cdot \frac{-s^2}{1 + \frac{js}{Q_{tc}} - s^2}$$

Mit den folgenden Umstellungen wird das ganze greifbarer.

$$s = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{2\pi \cdot f}{2\pi \cdot f_c}$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (C \text{ in Farad})$$

$$Q_t = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (L \text{ in Henry})$$

R = elektrischer Widerstand in Ohm

Für Y_c gilt jetzt:

$$Y_c = \frac{1}{R} \cdot \frac{-\omega \cdot L \cdot C}{1 + \frac{j\omega L}{R} - \omega \cdot L \cdot C}$$

Damit ist klar, wie die Resonanzfrequenz f_c und die Güte Q_t das Verhältnis von L/C (oder von Masse zu Feder, besser Nachgiebigkeit bei einer Box) im Ersatzschaltbild festlegt. Für eine Box mit $f_c = 35$ Hz, $Q_{tc} = 0,7$ und $R_{dc} = 6$ Ohm ergeben sich folgende Parameter:

$$\text{Nachgiebigkeit } L = \frac{R}{2\pi \cdot f_c \cdot Q_{tc}} = 0,0389 \text{ H}$$

(H = Henry)

$$\text{Masse } C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_c^2 \cdot L} = 0,0005316 \text{ F}$$

(F = Farad)

Jetzt ordnen wir der "elektrischen Masse" C über die Wandlerkonstante Bl eine echte Masse zu:

$$M_{ms} = C \cdot (Bl)^2$$

M_{ms} = bewegte Masse in kg

In diesem Fall gilt das gleiche Bl -Produkt auch für die nötige Nachgiebigkeit C_{mc} (in m/N):

$$C_{mc} = \frac{L}{(Bl)^2}$$

Für die gewünschte Membranfläche errechnet sich das Gehäusevolumen folgendermaßen:

$$V_{Box} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{mc} \cdot S_d^2$$

ρ = Luftdichte 1,19 kg/m³

c = Schallgeschwindigkeit 344,4 m/s

Das ist zwar nicht ganz korrekt, da die Membranaufhängung hier nicht berücksichtigt ist. Für eine überschlägige Kalkulation ist es jedoch ausreichend. Wenn Ihnen das Gehäuse zu groß ist, so hilft mehr Masse, die auch mit einer geringeren Nachgiebigkeit die gewünschte Resonanzfrequenz einstellt. Dummerweise liegen die Werte für C und L fest, besser das Verhältnis C/L , so daß mehr Masse nur dann funktioniert, wenn Sie gleichzeitig

das BI-Produkt entsprechend ändern. Denken Sie an die Güte Q_{tc} der Box:

$$Q_{tc} = R_{dc} \cdot \sqrt{\frac{M_{md}}{C_{mc} \cdot (BI)^2}}$$

Andernfalls würde bei einer Vergrößerung der bewegten Masse auch Q_{tc} verändert werden. Wenn Sie hier etwas rechnen, stellen Sie fest, daß einige Traumboxen leider bisher nicht gebaut werden konnten, da für manche Kombinationen BI-Produkte von 30 N/A und mehr bei $R_{dc} = 8$ Ohm notwendig wären. Das macht den Magnet teurer, als einen kompletten Verstärker für eine Aktivbox, mit der man die gewünschten Parameter einfacher realisieren kann (meist riesige Baßchassis in ganz kleinen Gehäusen und einer niedrigen unteren Grenzfrequenz).

Das sind die immer so geheimnisvoll umschriebenen Gesetze der Physik der Lautsprecher, an denen der Konstrukteur einer Passivbox wirklich nicht vorbeikommt. Tabellen hierzu kommen später in dem Kapitel über geschlossene Boxen. Hier sollte nur einmal die Übertragungsfunktion vorgestellt werden. Wir finden den Grund für den Zusammenhang zwischen $Q_1 = 0,707$ und maximal flachem Verlauf der Schalldruckkurve bei den geschlossenen Boxen aus der allgemeinen Form der Übertragungsfunktion für maximal flachen Verlauf:

$$|Y|^2 = |1 + X^{2n}|$$

Y = Ausgangsspannung zu Eingangsspannung

$$X = f_{-3dB}/f$$

n = Filterordnung.

Für ein Filter 2ter Ordnung gilt:

$$Y = 1 + j\sqrt{2} \cdot X - X^2$$

Daraus ergibt sich in Verbindung mit der Gleichung für Y_c für maximal flachen Verlauf:

$$Y_c = \frac{1}{R} \cdot \frac{-S^2}{1 + j\sqrt{2} \cdot S - S^2}$$

$$j\sqrt{2} \cdot S = \frac{jS}{Q_{tc}}$$

$$Q_{tc} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Das hat gewisse Konsequenzen für alle Lautsprecherkonstrukteure. Wenn Sie vor die Chassis Bauteile mit frequenzabhängiger Charakteristik schalten (Spulen und Kondensatoren), ergibt das eine neue Übertragungsfunktion, die dann meistens nicht so linear ist.

Welche Kombinationen von Chassis und vorgeschalteten Bauteilen ermöglichen einen maximal flachen Verlauf der Übertragungsfunktion? Bild 3.4 (a...g) zeigt verschiedene Kombinationen von Chassis und vorgeschalteten Bauteilen. Bild 3.4a zeigt noch einmal das vereinfachte Ersatzschaltbild.

Schaltet man einen Kondensator C_x vor das Chassis (der Lautsprecherbox), ergibt das ein Hochpaß-Filter dritter Ordnung.

Die Übertragungsfunktion ist für maximal flachen Verlauf:

$$Y_c = \frac{1}{R} \cdot \frac{-js^3}{1 + 2js - 2s^2 - js^3}$$

$$Y_c = \frac{1}{R} [-j\omega^3 RLC \cdot C_e]$$

$$[1 + j\omega RC_e - \omega^2 L(C + C_e) -$$

$$j\omega^3 RLC \cdot C_e]^{-1}$$

4a

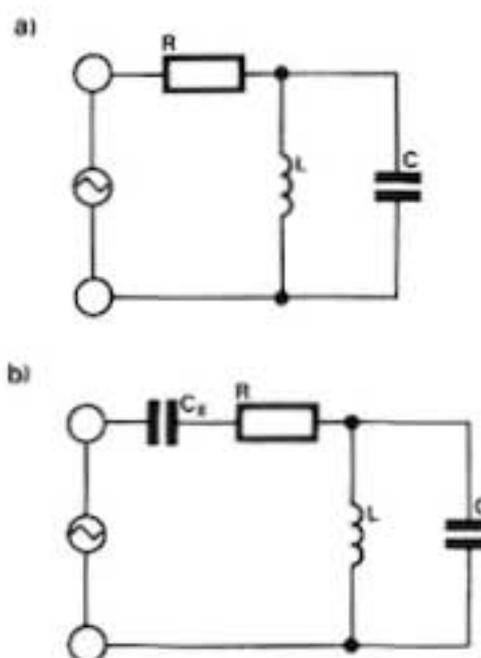


Bild 3.4. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Kombination von Lautsprecherchassis und externen passiven oder aktiven Komponenten:

a) Chassis alleine

b) Chassis mit vorgeschaltetem Kondensator (6 dB Filter ergibt 18 dB gesamt: 3te Ordnung)

Für s und ω werden wieder folgende Ausdrücke eingesetzt:

$$s = \frac{\omega}{\omega_c}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L}}$$

Um jetzt ohne große Rechnerei Zahlen miteinander zu vergleichen, werden die Ergebnisse auf $R_{dc} = 1$ und $f = f_{-3\text{ dB}}$ normiert. Die Werte für bestimmte -3 dB Frequenzen und R_{dc} der Chassis finden wir, wenn man alle in der folgenden Tabelle aufgelisteten Werte für C und L multipliziert mit:

$$\text{(für C): } \frac{1}{2\pi \cdot f_{-3\text{ dB}} \cdot R_{dc}}$$

$$\text{(für L): } \frac{R_{dc}}{2\pi \cdot f_{-3\text{ dB}}}$$

Die Werte für das Filter zweiter Ordnung sind: $L = 1,414$, $C = 0,707$, $f_s = 1,000$ und $Q_t = 0,707$.

Für das Filter dritter Ordnung gilt bei einem C_x von $2,000$: $L = 0,750$, $C = 0,667$, $f_s = 1,414$ und $Q_t = 0,943$.

Der zusätzliche Kondensator C_x hat das Gehäusevolumen für die gleiche -3 dB Frequenz fast halbiert und die benötigte bewegte Masse noch etwas reduziert. Gleichzeitig ist noch ein Schutzfilter für tieffrequente Störgeräusche entstanden. Diese Kombination von C_x , C und L ist die einzige, die einem maximal linearen Verlauf der Schalldruckkurve ergibt: es ist ein Butterworth-Filter.

Die Berechnung dieser Werte für C , L , und C_x erfolgt über die Übertragungsfunktion, indem für alle benötigten Bauteile Koeffizienten eingeführt werden. Ein kleines Beispiel.

Eingesetzt ergibt sich für einen Tiefpaß:

$$L = a; C = b; L_x = c;$$

$$Y_c = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{abc s^3 + abs^2 + (a + c)s + 1}$$

$$= \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$$

Da die Koeffizienten der verschiedenen Potenzen gleich sein müssen, folgt:

$$abc = 1; ab = 2; a + c = 2$$

Daraus wiederum:

$$L = a = 3/2; C = b = 4/3; L_x = c = 1/2$$

Für einen Hochpaß werden die Induktivitäten und Kapazitäten vertauscht und die Werte durch ihre Kehrwerte ersetzt.

4c

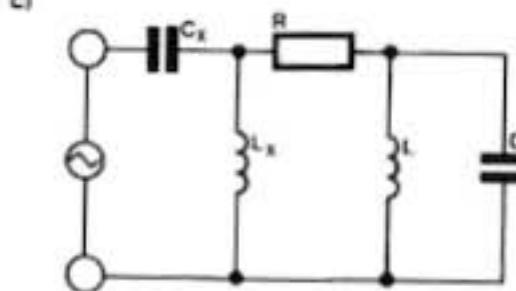


Bild 3.4c. Chassis mit vorgeschalteter Spule und Kondensator (12 dB Filter ergibt 24 dB gesamt: 4te Ordnung)

$$C = 2/3 = 0,667; L = 3/4 = 0,750; C_x = 2/1 = 2,000$$

Die Werte sind bereits bekannt. Um hier unnötige Rechenarbeit zu vermeiden, sind die Ergebnisse für Filter verschiedener Ordnung in einer Tabelle zusammengefaßt.

Ein Filter vierter Ordnung entsteht, wenn vor dem Chassis (der Lautsprecherbox ein Kondensator C_x und eine Spule L_x geschaltet ist (Bild 3.4c).

Für maximal flachen Verlauf der Wiedergabekurve gibt es hier zwei Lösungen der Übertragungsfunktion.

Eine Lösung setzt die Resonanzfrequenz des Chassis unter die des Filters. So läßt sich eine 24 dB Frequenzweiche (vierter Ordnung) für Mittel- und Hochtonchassis realisieren, die mit nur zwei externen Bauteilen aufgebaut ist. Leider sind die Möglichkeiten etwas eingeschränkt, denn die Werte L und C des Chassis können Sie in vielen Fällen nicht direkt beeinflussen, da das Chassis bereits mit einem Gehäuse versehen ist. Hier können Sie nur indirekt über die Vergrößerung von R_{dc} durch vorgeschaltete Widerstände etwas machen.

Die andere Lösung setzt die Resonanzfrequenz des Filters unter die von Chassis/Box. Bei dieser Lösung ergibt sich ein Gehäusevolumen von nur 28 % des Volumens einer vergleichbaren Box 2ter Ordnung. Damit simuliert man praktisch eine elektronische Baßreflexbox, ohne aber den für übliche Baßreflexboxen notwendigen größeren (und teureren) Magneten zu benötigen.

Mit dieser Abstimmung können Sie zum Beispiel schöne kleine Satellitenboxen konstruieren. Da bei Filtern 4ter Ordnung der Schalldruck unterhalb der Resonanzfrequenz

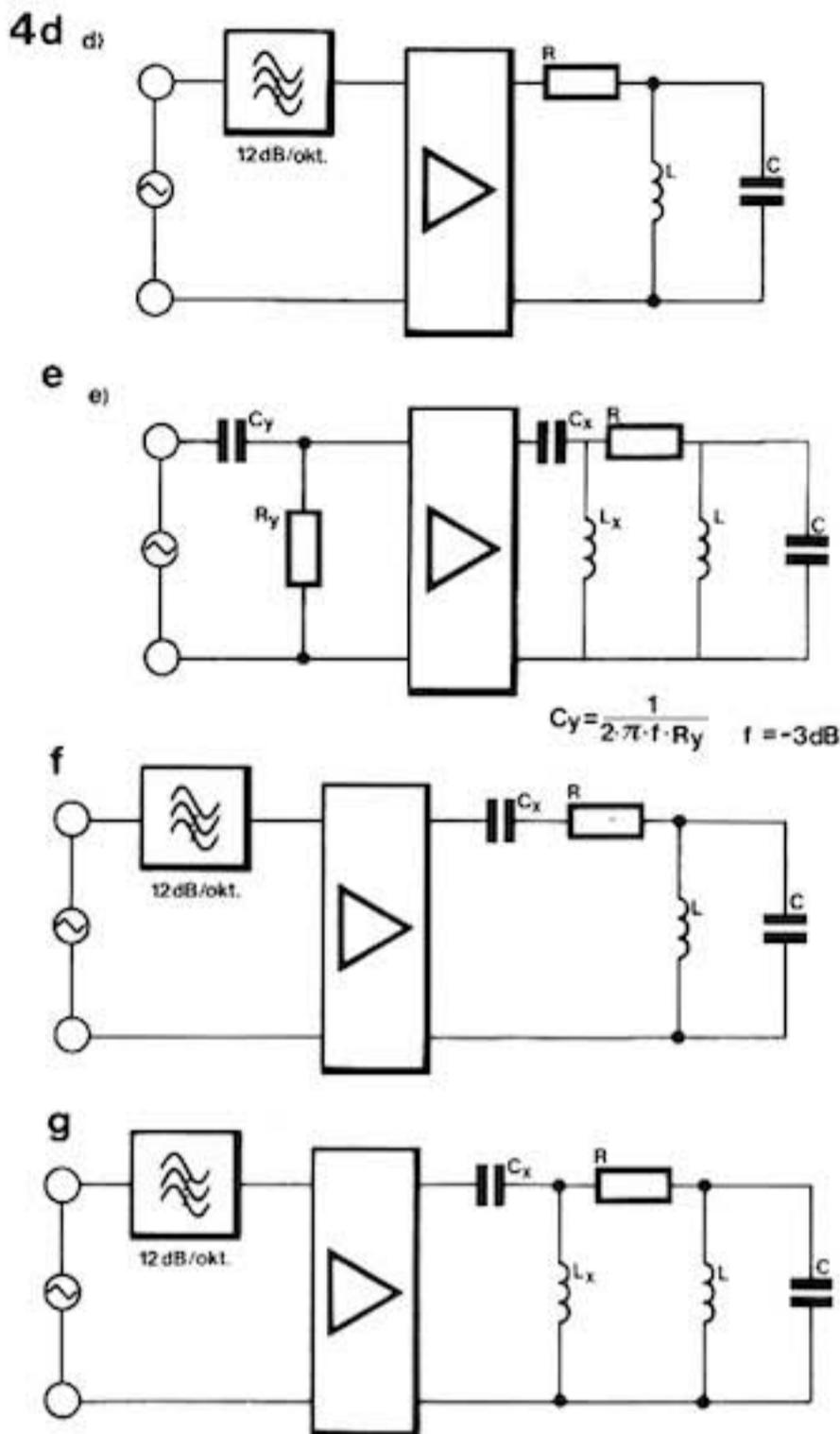


Bild 3.4d. Aktive Ansteuerung mit vorgeschaltetem Filter (6 dB Filter ergibt 18 dB gesamt)

e) Aktive Ansteuerung mit vorgeschaltetem Filter (12 dB Filter ergibt 24 dB gesamt)

f) Aktive Ansteuerung mit aktiven 12 dB Filter und passivem 6 dB Filter (30 dB gesamt: 5te Ordnung)

g) Aktive Ansteuerung mit aktivem 12 dB Filter und passivem 12 dB Filter: 6te Ordnung

mit 24 dB/Okt abnimmt, ist bei Boxen für den Betrieb ohne Subwoofer aber auf ausreichend tiefe -3 dB Frequenzen zu achten, sonst wird die Baßwiedergabe etwas dünn (wie bei Baß-reflexboxen übrigens auch).

Butterworth-Filter höherer Ordnung sind nur realisierbar, wenn die einzelnen Filterstufen durch Verstärker entkoppelt werden, so wie es die Bilder 3.4d bis 3.4g andeuten.

Die Tabelle listet die normierten Werte für Filter bis zur 6ten Ordnung auf.

Die Werte sind normiert auf eine -3 dB Frequenz ($f_{-3\text{dB}}$) von $\omega = 1$ ($\omega = 2\pi \cdot f$).

$L = 1/\text{Federsteife} = \text{Nachgiebigkeit}$

$C = \text{gesamte bewegte Masse}$

$f_s = \text{Resonanzfrequenz}/-3\text{ dB Frequenz}$

Tabelle

L	C	f_s	Q_t	f1	Cx	Lx	fx	f2	Q2	f_m	Z_{\min}
1,414	0,707	1,000	0,707	1,414							
0,750	0,667	1,414	0,943	1,500	2,000					1,000	0,699
0,639	0,507	1,758	0,890	1,974	1,565	1,974	0,569			0,412	0,863
1,974	1,565	0,569	0,890	0,639	0,507	0,639	1,758				
0,765	1,307	1,000	1,307	0,76				1,000	0,541		
1,848	0,541	1,000	0,541	1,848				1,000	1,307		
0,618	0,618	1,618	1,000	1,618	1,618	1,618	0,618	1,000		0,347	0,911
1,618	1,618	0,618	1,000	0,618	0,618	0,618	1,618	1,000			
0,854	0,447	1,618	0,724	2,236	2,618			1,000	1,618	1,000	0,939
0,618	1,000	1,272	1,272	1,000	1,618			1,000	0,618	1,000	0,931
0,607	0,365	2,124	0,775	2,739	1,647	2,739	0,471	1,000	1,932	0,562	0,878
2,739	1,647	0,471	0,775	0,607	0,365	0,607	2,124	1,000	1,932		
0,733	0,521	1,618	0,843	1,919	1,365	1,919	0,618	1,000	0,707	0,357	0,936
1,919	1,365	0,618	0,843	0,733	0,512	0,733	1,618	1,000	0,707		
0,568	0,743	1,515	1,126	1,346	1,706	1,346	0,660	1,000	0,518	0,284	0,916
1,346	1,706	0,660	1,126	0,586	0,743	0,586	1,515	1,000	0,518		

Q_t = Gesamtgüte von Chassis oder Chassis in geschlossener Box

f_1 = Linearer Frequenzverlauf (0 dB Absenkung) ohne Filter

C_x = externer Kondensator

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{-3dB} \cdot R_{dc}}$$

L_x = externe Spule

$$L = \frac{R_{dc} \cdot L_x}{2\pi \cdot f_{-3dB}}$$

f_x = Resonanzfrequenz des Filters

$$= \frac{\sqrt{L \cdot C}}{2\pi \cdot f_{-3dB}}$$

f_2 = Grenzfrequenz des entkoppelten Filters 1ter, 2ter Ordnung

Q_2 = Güte des entkoppelten aktiven Filters 2ter Ordnung

f_m = Frequenz minimaler Impedanz

Z_m = minimale Impedanz

Beachten Sie in der Tabelle die Spalten für f_m und Z_{min} . Bei manchen Kombinationen sinkt die Impedanz unter R_{dc} , so daß bei Chassis mit R_{dc} kleiner 4 Ohm eine für manche Verstärker gefährlich niedrige Impedanz auftreten kann. Bei diesen Berechnungen wurde als bedämpfender Widerstand R_{dc} angenommen.

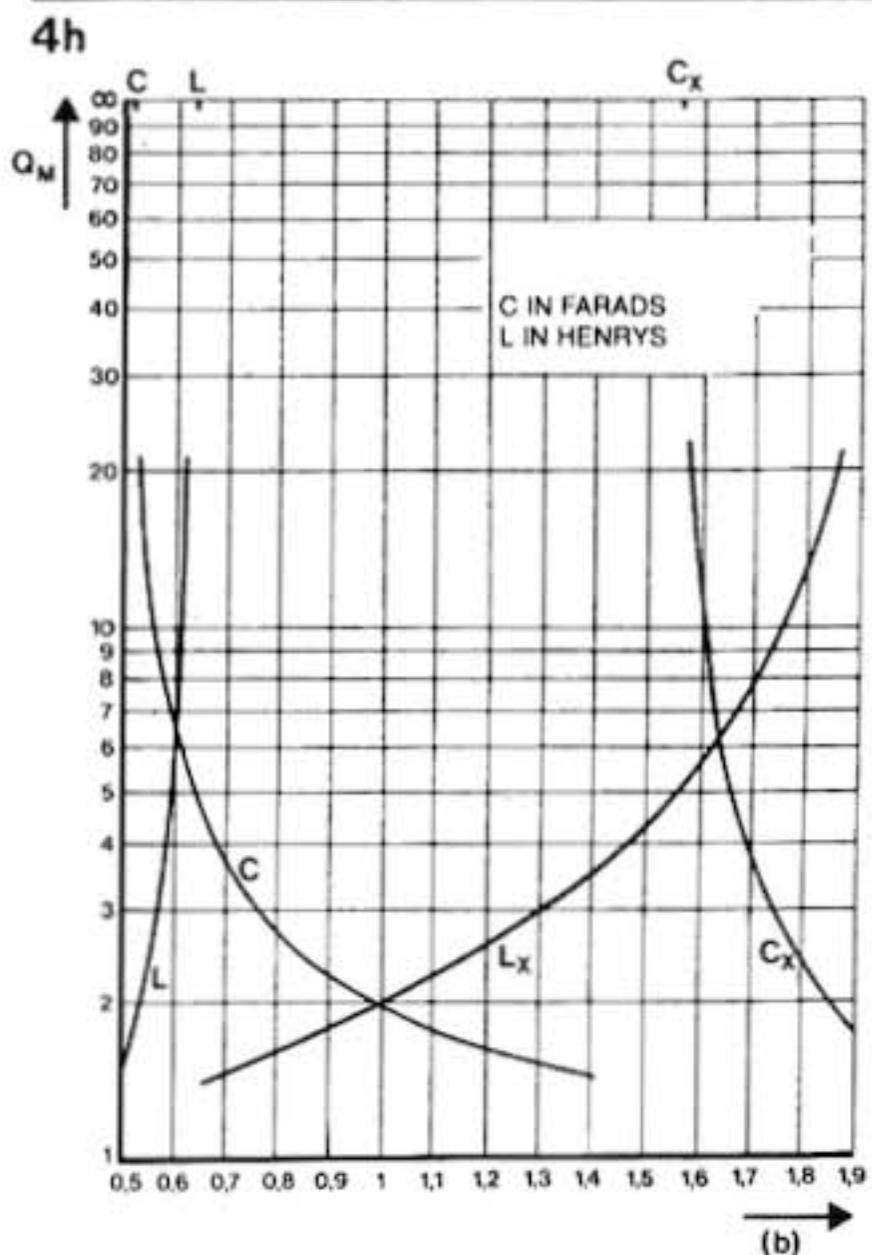
Das Diagramm in Bild 3.4h zeigt den Einfluß der mechanischen Widerstände R_{ms} , die über Q_m die Gesamtgüte Q_t beeinflussen für ein vorgeschaltetes L-C Filter (Box 4ter Ordnung).

Bei Chassis oder Boxen mit hoher mechanischer Bedämpfung (Q_m kleiner 20), müssen daher die Werte für R_{dc} entsprechend korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt über das Verhältnis von Q_e/Q_{ts} , da Q_{ts} alle bedämpfenden Widerstände enthält, während Q_e nur die Wirkung der elektrischen Bremse zeigt. Da Sie bei allen Berechnungen am vereinfachten Ersatzschaltbild immer nur mit elektrischen Größen rechnen, müssen Sie mit einem Wert für Q_e bzw. R_{dc} rechnen, in dem R_m schon enthalten ist. Ist zum Beispiel $Q_m = 4,5$, $Q_e = 0,36$ und $Q_t = 0,333$, so muß R_{dc} (z.B. 6,2 Ohm) auf

$$R'_{dc} = \frac{R_{dc} \cdot Q_t}{Q_e}$$

(hier 5,7 Ohm) verringert werden, um den Einfluß von R_{ms} in die Rechnung mit einzubeziehen.

(Dort wo die Bezeichnungen s und c für die



86902-3-4h

Bild 3.4h. Bei geringen Werten für Q_m ist eine deutliche Korrektur in der Tabelle erforderlich, um den Einfluß von R_{ms} zu berücksichtigen. Es ist natürlich möglich, auch gleich mit korrigierten Werten für R_{dc} zu rechnen.

Werte Q_t , f , usw. fehlen, sind die Berechnungen identisch.)

Mit Hilfe der beiden Formeln für Q_e und Q_m können die beiden Widerstände R_{ms} und R_{dc} gleichgesetzt werden. Es läßt sich praktisch jeder mechanische Widerstand mit einem elektrischen Widerstand simulieren. Ist z.B. bei einem sehr stark mechanisch gebremstem Chassis $Q_e = Q_{ms}$, so hat Q_{ts} den halben Wert von Q_{ms} und R'_{dc} hat den halben Wert von R_{dc} . Auf diese Weise kann Q_{ms} bei Hochtchassis und Mitteltonchassis mit einem rückseitig angebrachten Gehäuse problemlos in jede Berechnung einbezogen werden.

Ebenso kann verfahren werden, um den Einfluß von Dämmmaterial in noch nicht vorhandenen Gehäusen überschlägig zu kalkulieren. Die

ideale Box hat außer der mechanischen Reibung der Membranaufhängung keine Reibungsverluste, es gilt: $R_{mc} = R_{ms}$. Durch Dämmaterial wird ein weiterer Reibungswiderstand parallel zu R_{mc} geschaltet, was die Werte für Q_{mc} sowie Q_{tc} verringert (die Bedämpfung vergrößert).

Die gesamte Güte des eingebauten Tief- oder Mittelton-Chassis Q'_{tc} , die alle Reibungswiderstände berücksichtigt, wird bei geschlossenen bedämpften Gehäusen oft mit Hilfe eines Standard-Verlustfaktors $Q_l = 5,0$ berechnet. Dieser Verlustfaktor repräsentiert den Einfluß des Dämmaterials, wenn das gesamte Gehäusvolumen locker damit aufgefüllt ist.

Für die Gesamtgüte der kompletten Box gilt:

$$Q'_{tc} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{ec}} + \frac{1}{Q_{mc}} + \frac{1}{Q_l}}$$

Q'_{tc} = Gesamtgüte einschließlich Q_l
 Q_{ec} = errechnete elektrische Güte
 Q_{mc} = errechnete mechanische Güte
 Q_l = Verlustfaktor Gehäuse

Es kann jetzt der Einfluß von Q_l so umgestellt werden, daß sich R_{dc} entsprechend modifizieren läßt. Es gibt aber einen einfacheren Weg, um jeden beliebigen Verlustfaktor in die Rechnung mit einzubeziehen. Auch hier gilt:

$$Q_l = \frac{2\pi \cdot f_c \cdot M_{md}}{R_l}$$

$$R_l = \frac{2\pi \cdot f_c \cdot M_{md}}{Q_l}$$

Wir vergrößern einfach die Werte, die in der Tabelle für Q_{tc} angegeben sind zu einem neuen Wert Q''_{tc} nach der Formel:

$$Q''_{tc} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{tc}} - \frac{1}{Q_l}}$$

Q''_{tc} = geänderte neue Güte Q_{tc}
 Q_{tc} = Güte Q_{tc} aus der Tabelle
 Q_l = beliebiger Verlustfaktor

Wird mit den Werten Q_{tc} aus der Tabelle gerechnet, läßt sich der neue Wert sofort zur weiteren Berechnung verwenden. Rechnet man dagegen mit den normierten Werten für Masse C und Nachgiebigkeit L, dann ist der normierte Wert für L (da an der bewegten Masse meist wenig zu ändern ist) abzuändern. Für die auf $R = 1$ normierten Werte gilt:

$$Q = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$L = \frac{C}{Q^2}$$

Betrachten Sie das am Beispiel der geschlossenen Box mit $C = 0,707$ und $Q_{tc} = 0,707$:

$$L = \frac{0,707}{0,707^2} = 1,414$$

Mit einem $Q_l = 5,0$ in der Rechnung wird Q''_{tc} zu:

$$Q''_{tc} = \frac{1}{\frac{1}{0,707} - \frac{1}{5,0}} = 0,8234$$

Der neue normierte Wert L' für L in der Tabelle wäre dann:

$$L' = \frac{C}{Q''^2} = \frac{0,707}{0,8234^2} = 1,043$$

Die Rechnung macht deutlich, daß die Nachgiebigkeit der Kombination Chassis/Gehäuse (und damit das Gehäuse) kleiner werden muß, um wieder den richtigen Q_{tc} einzustellen. Gegenüber einer Konstruktion ohne Verluste steigt die -3 dB Frequenz um einen bestimmten Faktor an:

$$f''_{-3\text{ dB}} = f_{-3\text{ dB}} \cdot \sqrt{\frac{L}{L'}} = f_{-3\text{ dB}} \cdot 1,16$$

Bei allen Berechnungen fehlt noch der elektrische Widerstand von vorgeschalteten Kabeln und Weichenbauteilen. Dieser Widerstand verschlechtert die elektrische Bedämpfung des Chassis (vergrößert Q_{ec}) und wirkt damit entgegengesetzt zu Reibungswiderständen, indem er Q_{tc} vergrößert.

Logischerweise kann er berücksichtigt werden, indem umgekehrt wie bei dem Einfluß der Reibungswiderstände durch Q_m vorgegangen wird. Im ersten Fall haben wir R_{dc} bei den Berechnungen um einen bestimmten Faktor auf R'_{dc} vergrößert. Um die vorgeschalteten elektrischen Widerstände zu erfassen, müssen wir R_{dc} etwas verkleinern. Das geschieht vor allen anderen Berechnungen, da die Widerstände R_{ext} nur Q_e beeinflussen. Hat das Chassis einen Gleichstromwiderstand R_{dc} von 6 Ohm,

wird außerdem ein Widerstand R_{ext} von 1 Ohm bei den Zuleitungskabeln und den Weichenbauteilen gemessen, dann ergibt sich:

$$R''_{\text{dc}} = R_{\text{dc}} \frac{R_{\text{dc}}}{R_{\text{dc}} + R_{\text{ext}}} \\ = 6 \frac{6}{6 + 1} = 5,14$$

Das Verhältnis 6/7 entspricht übrigens recht genau dem Kehrwert des Faktors 1,16, den wir bereits bei der Kompensation der Verluste durch den Gehäuseeinbau auf unsere Rechnung draufgeschlagen haben. Das entspricht der Erfahrung, daß bei geschlossenen Boxen mit vorwiegend elektrischer Bedämpfung durch Q_{ec} die üblichen Vorwiderstände die Änderung der Bedämpfung durch Dämmmaterial im Gehäuse kompensieren. Dazu in Kapitel 4 noch mehr.

Frequenzweichen

In der Tabelle gibt es nur wenige Kombinationen aus Spulen, Kondensatoren oder aktiven Filtern, die mit einem Lautsprecherchassis zusammen eine gewünschte Butterworth-Übertragungsfunktion ergeben. Dabei sind die mechanischen und elektrischen Parameter, die das Chassis jeweils aufweisen muß, genau festgelegt. Vermutlich ahnen Sie jetzt bereits, warum manche Frequenzweichen trotz richtiger Berechnung nach den einschlägigen Gleichungen und Tabellen so eigenartige Ergebnisse liefern, wenn sie mit Lautsprecherchassis kombiniert werden. Was geschieht, wenn (nach üblichen Tabellen) richtig berechnete Frequenzweichen vor ein Chassis geschaltet werden? Beginnen wir mit einem Filter 1ter Ordnung, der vielgelobten 6-dB-Weiche (die Sperrwirkung beträgt 6 dB/Okt); in Bild 3.5 ist hierfür ein Beispiel dargestellt. Die Übertragungsfunktion macht den guten Ruf, den diese Filter haben, recht deutlich. Die Summe von $V_{\text{Baß}}$ und V_{Hoch} ist 1, denn:

$$V_{\text{Baß}} = \frac{1}{s + 1}$$

$$V_{\text{Hoch}} = \frac{s}{s + 1}$$

$$\text{Summe} = \frac{s}{s + 1} + \frac{1}{s + 1} = \frac{s + 1}{s + 1} = 1$$

Das addierte Ausgangssignal des Filters hat die gleiche Amplitude und Phasenlage wie das Eingangssignal; daher auch die Bezeichnung

5

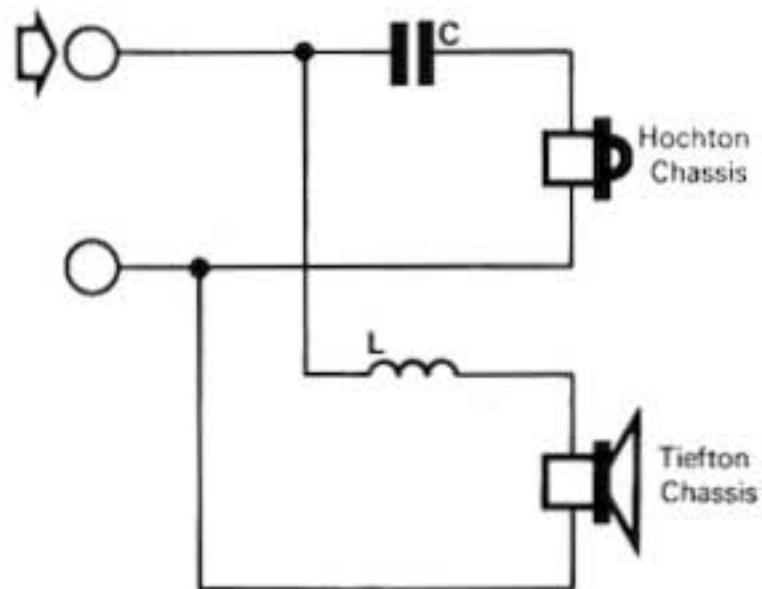


Bild 3.5. Der Aufbau einer 6 dB Weiche (Filter 1ter Ordnung).

Linear-Phase. Dieser Umstand ist eine gefährliche Verlockung für viele Hobby-Konstrukteure. Gefährlich deshalb, weil es kaum Chassis gibt, die den Anschluß an diese Filter längere Zeit überstehen. Sie erinnern sich: Um unabhängig von der Frequenz eine konstante Schallenergie abzustrahlen, muß die Membranauslenkung im Quadrat zu tiefen Frequenzen zunehmen; das gilt bis zur Resonanzfrequenz des Chassis. Das 6-dB-Filter reduziert diese Membranauslenkung nur linear, so daß sie auch im Sperrbereich des Filters immer größer wird. Ohne zusätzliche Absenkung der Membranauslenkung (durch das Chassis unter der Resonanzfrequenz) werden hierbei starke Verzerrungen erzeugt, denn die Hochtonchassis sind meist nicht besonders langhubig ausgelegt. Im ungünstigsten Fall wird das Chassis nach kurzer Zeit durch die permanente Auslenkung bis zum mechanischen Anschlag sogar zerstört. Außerdem ist die Übertragungsfunktion der Kombination aus Weiche und Chassis nicht die eines Filters erster, sondern die eines Filters dritter Ordnung (allerdings kein Butterworth-Filter), denn der Hochpaß Chassis addiert sich zum Hochpaß der Weiche. Für ein Hochtonchassis mit $Q_{\text{ts}} = 0,707$ und $f_s = f - 3\text{dB}$ Weiche bedeutet das:

Hochpaß addiert:

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{s}{s + 1} + \frac{s^2}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2}$$

Butterworth Hochpaß 3ter Ordnung:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^3}{1 + 2s + 2s^2 + s^3}$$

Weiterhin erzeugt der große Überlappungsbe- reich durch die geringe Sperrwirkung ärgerliche Interferenzen zwischen Tiefton- und Hochton-Chassis, so daß in jede Richtung ein anderes akustisches Signal abgestrahlt wird. Die Filter 2ter Ordnung (Bild 3.6) weisen eine Sperrwirkung von 12 dB/Okt auf. Überlastungen der Chassis und Interferenzen werden deutlich verringert.

Allerdings, das ist der große Nachteil, ist die Summe der Übertragungsfunktionen nicht gleich 1; damit verfälscht die Weiche das elektrische Signal.

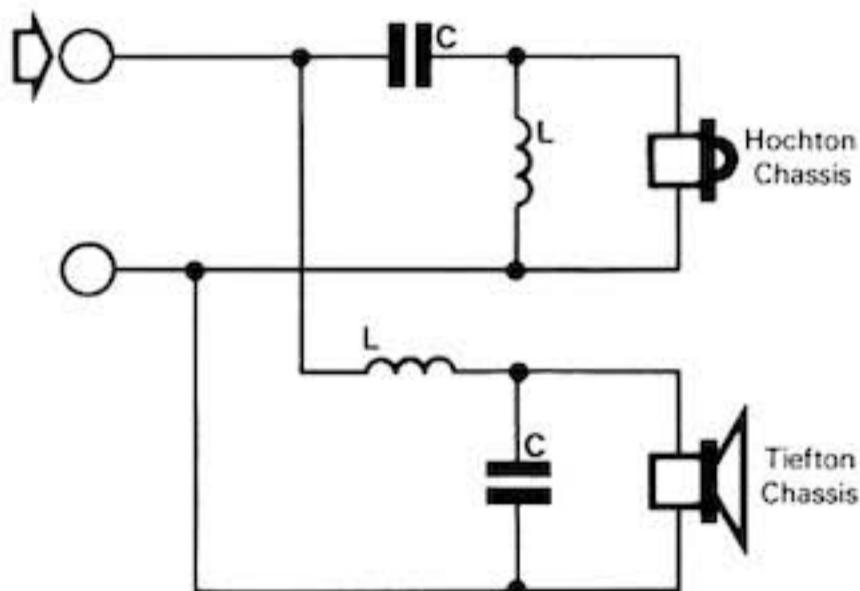
Die Addition lautet:

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{1}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2} + \frac{s^2}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2} \\ &= \frac{1 + s^2}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2} \end{aligned}$$

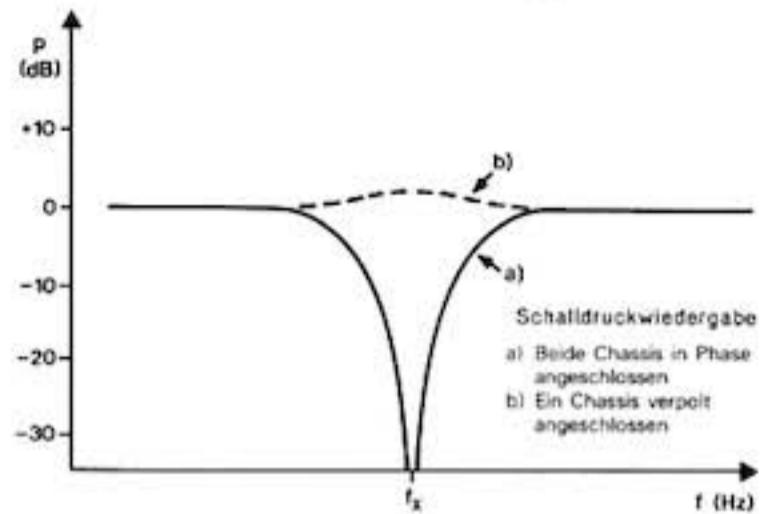
Das Ergebnis sieht dann hinter der Weiche so aus, wie es in Bild 3.7 gezeichnet ist. Dabei gibt es noch den Unterschied, ob die Chassis gleich- oder gegenphasig angesteuert werden.

Bild 3.6. Der Aufbau einer 12 dB Weiche (Filter 2ter Ordnung).

6

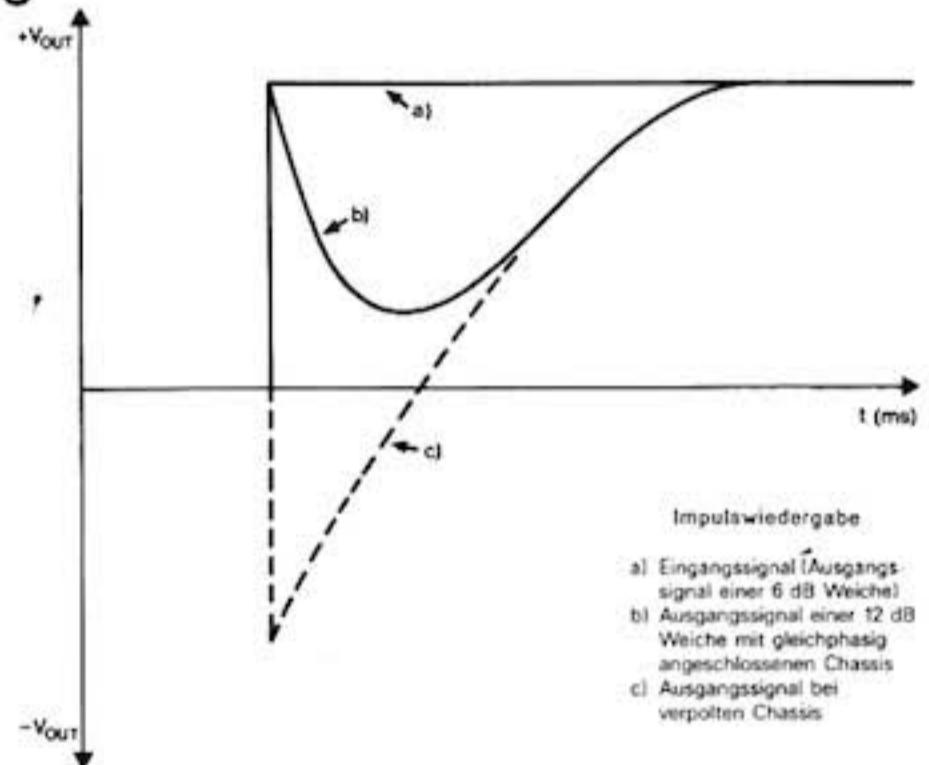


7



86902-3-7

8



86902-3-8

Bild 3.7. Die Signaladdition bei einer 12 dB Weiche.

Bild 3.8. Das Impulsverhalten (Sprungantwort) des 12 dB Filters bei der Addition der Signale am Ausgang der Weiche.

Auch läßt das Impulsübertragungsverhalten des Filters zu wünschen übrig (Bild 3.8). Ein angeschlossenes Chassis verschlechtert das Ergebnis weiter.

Dabei macht es keinen großen Unterschied, ob das Filter als Bessel-, Butterworth- oder Linkwitz-Riley-Filter berechnet ist. Das Ergebnis ist immer ähnlich unbefriedigend. Besser wird es, wenn Sie mit Verzögerungszeiten (Delay) und Überlappungsbereichen (Overlap) durch verschiedene Filtergrenzfrequenzen und zurückversetzte Mittel- bzw. Hochtonchassis arbeiten (Bild 3.9).

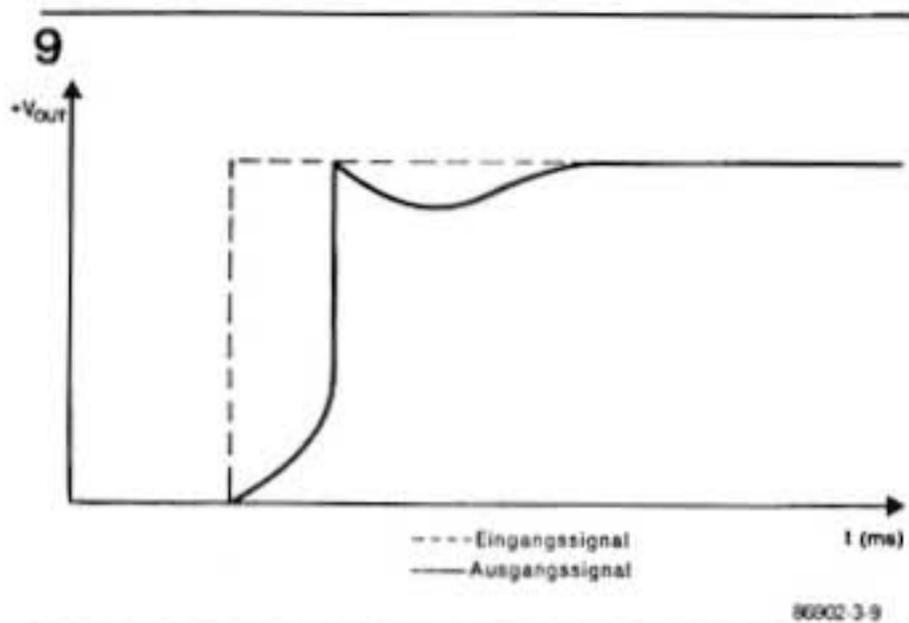


Bild 3.9. Das Impulsverhalten einer 12-dB-Weiche mit Overlap und akustischem Delay durch zurückversetzte Mittel- bzw. Hochtonchassis.

Dabei erreicht man die besten Ergebnisse, wenn die Trennfrequenz f_l für das Tieftonchassis um den Faktor 1,6 über der Trennfrequenz f_h des Hochtonchassis liegt. Das nötige Delay im Hochpaß wird erzeugt, indem das Hochtonchassis um ein Viertel der Wellenlänge von f_h zurückversetzt wird. Dies ist ein einfacher Weg, um die Wiedergabe beim Einsatz von einfach zu berechnenden 12 dB Weichen zu verbessern. Die Einflüsse der Chassis dürfen auch hier natürlich nicht vergessen werden, wir kommen später noch darauf zu sprechen.

Dieses Impulsverhalten gilt natürlich nur auf Achse gemessen. Durch das zurückversetzte Hochtonchassis gibt es bei übereinander montierten Chassis Interferenzeffekte bei der Abstrahlung nach oben und unten. Das ist zum Glück für die Stereoortung weniger störend gegenüber den seitlichen Interferenzen. Es ist daher sinnvoll, die Chassis immer übereinander zu montieren.

Eine andere Lösung zur Verbesserung von Phasen- und Amplitudenverhalten ist das Filler-Driver Konzept. Durch einen zusätzlichen Bandpaß wird die Summe der Übertragungsfunktionen einer 12 dB Frequenzweiche wieder auf den Wert 1 gebracht.

Ein nach diesem Konzept aufgebautes Filter hat die folgende Übertragungsfunktion:

Bandpaß:

$$\frac{\sqrt{2} \cdot s}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2} + \frac{1 + s^2}{1 + \sqrt{2} \cdot s + s^2} = 1$$

Die Summe der Übertragungsfunktionen ist dabei wieder gleich 1. Ein Bandpaß mit der gleichen Mittenfrequenz wie die Übernahmefrequenz der Weiche für Tief- und Hochtonchassis erfüllt diese Übertragungsfunktion perfekt, wenn die denormierten Werte aus der Tabelle für Frequenzweichenberechnungen (folgt weiter hinten) eingesetzt werden. Probleme schaffen allerdings auch hier die Interferenzen durch den großen Überlappungsbereich und die Anforderungen an den Filler-Driver, der über 4 bis 5 Oktaven ohne Schallbündelung und mit ausreichender Membranauslenkung arbeiten muß. Dafür sind die Anforderungen an Tiefton- und Hochtonchassis geringer als bei 6 dB Weichen. Hier lassen sich echte Tiefton- und Hochtonchassis einsetzen. Das Amplituden- und Impulsverhalten beim Filler-Driver-Konzept zeigen die Bild 3.10a und 3.10b in denen die Addition der Ausgangssignale dargestellt ist.

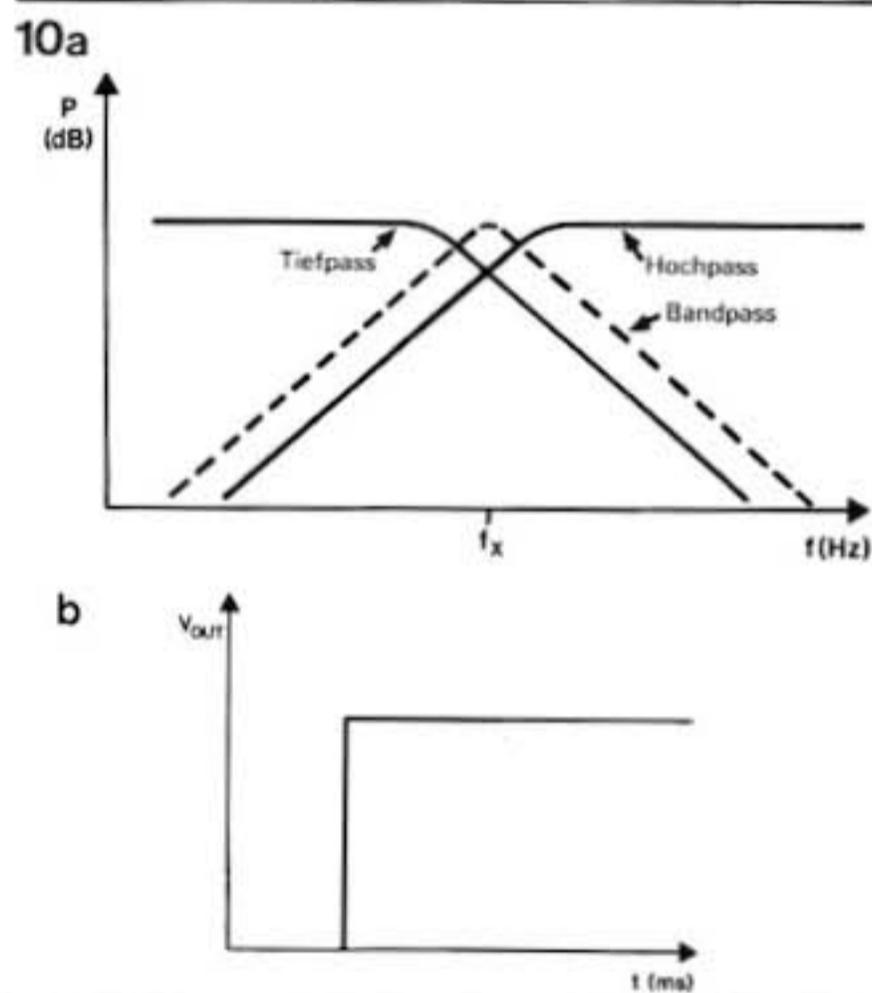


Bild 3.10a. Das Filler Driver Konzept. Alle Chassis sind gleichphasig angeschlossen. Die Bandpaß-Mittenfrequenz und die Trennfrequenz von Tiefpaß/Hochpaß ist identisch.

Bild 3.10b. Das Impulsverhalten der Filler-Driver-Weiche zeigt keinen Unterschied zwischen dem Eingangssignal und dem Ausgangssignal.

Die Weichen nach dem Filler-Driver-Konzept sollten Sie aber nur dann in Erwägung ziehen, wenn einige Meßgeräte zur Verfügung stehen. Hierbei ist es nämlich wichtig, alle Übertragungsfunktionen exakt einzuhalten, was eine

Bild 3.11a. Bei aktiven Frequenzweichen kann der Bandpaß zu dem Tiefpaß addiert werden; das Filler-Driver-Chassis wird damit überflüssig.

Bild 3.11b. Schaltung einer aktiven Frequenzweiche.

Kompensation der Chassiseinflüsse etwas schwierig macht.

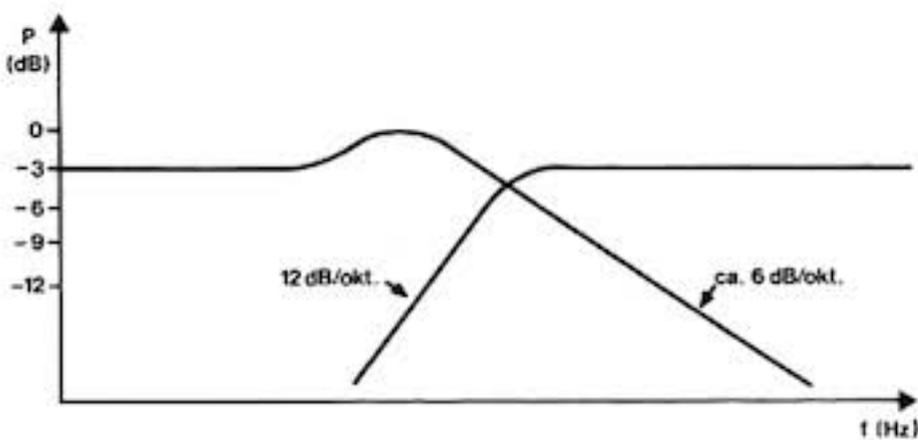
Bei aktiven Konzepten ist es etwas einfacher (Bild 3.11a). Hier wird die fehlende Übertragungsfunktion des Bandpasses einfach zu einem Tiefpaß addiert; damit ist das Filler-Driver-Chassis nicht mehr erforderlich.

Aus dem Kurvenverlauf geht hervor, daß eine passive Lösung nicht so sinnvoll ist. Für die 3 dB Absenkung des Tieftonchassis müßte fast die halbe Verstärkerleistung in der Frequenzweiche verbraten werden. Das aktive Konzept (Bild 3.11b) ist zwar aufwendiger, da zwei Endverstärker notwendig sind, hat jedoch den genannten Nachteil nicht.

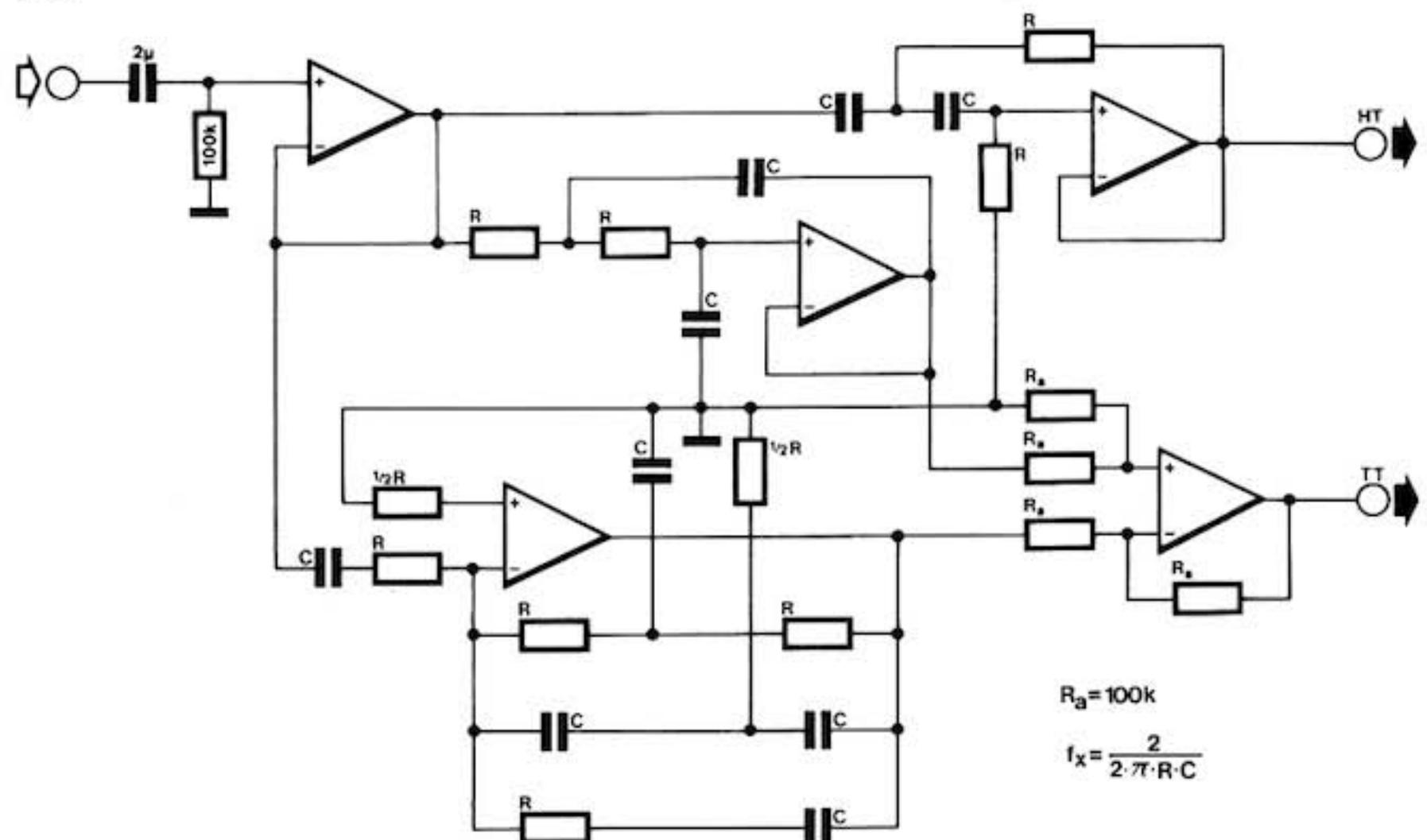
Hier stört wiederum der große Überlappungsbereich. Außerdem muß das Tieftonchassis hochohmig sein, da dessen Absenkung nur etwa 6 dB/Okt beträgt. Das Chassis sollte noch 2 bis 3 Oktaven über der Trennfrequenz ohne Bündelung und Partialschwingungen arbeiten können.

Bei Filtern 3ter Ordnung (Bild 3.12) wird die Belastung der Chassis sowie der Einfluß von Interferenzen weiter verringert. Auch ist das Amplitudenverhalten gut; nur das Impulsübertragungsverhalten läßt zu wünschen übrig.

11a



11b



88902-3-11b

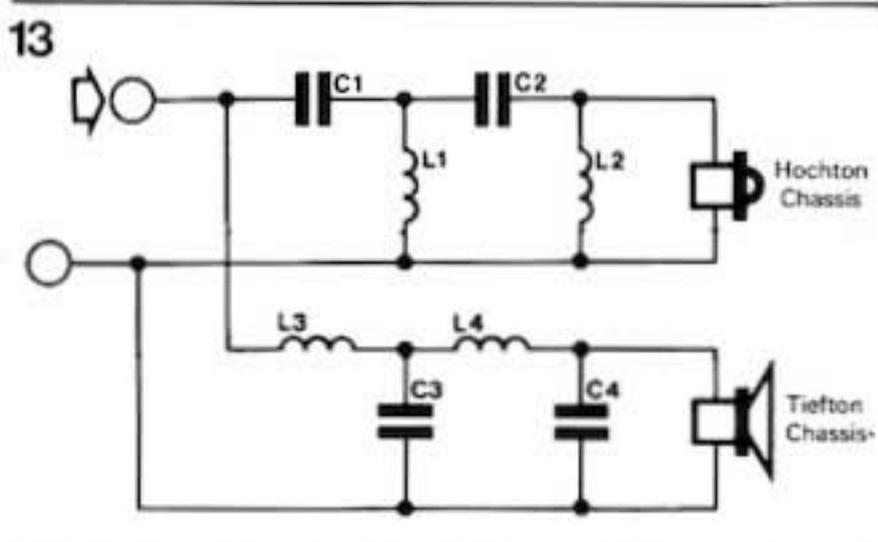
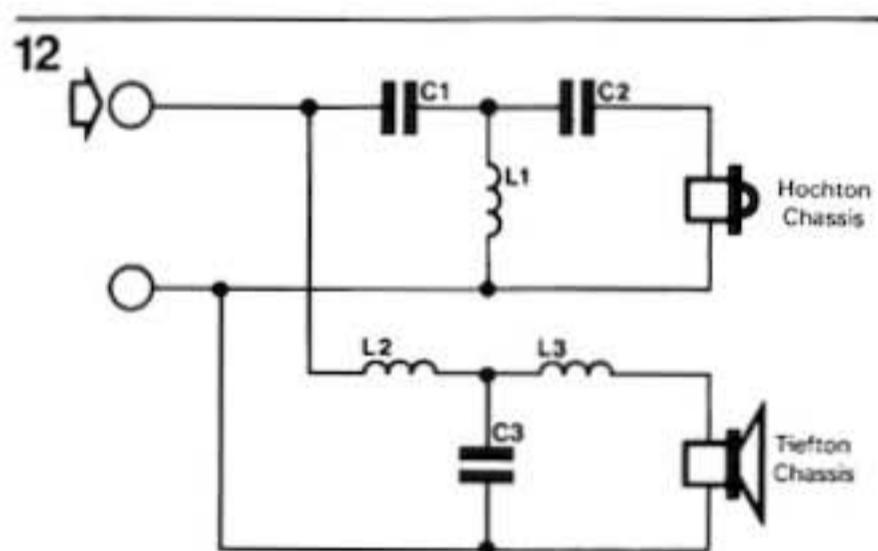
Das Impulsübertragungsverhalten läßt sich leider auch nicht durch Overlap und Delay brauchbar verbessern. Versuche in dieser Richtung können Sie sich getrost schenken. Was hilft, ist wieder das Filler-Driver-Konzept. Dabei muß aber jetzt der Schalldruck (db/1W/1m) des Filler-Drivers um 6 dB über dem der anderen Chassis liegen. Die normierten Werte entnehmen Sie der Filter-Tabelle. Noch ein kurzer Hinweis, um Mißverständnisse zu vermeiden. Bei den Filler-Driver Berechnungen sind Grenzfrequenz von Hochpaß, Tiefpaß und Bandpaß-Mittelfrequenz identisch! Es muß für die Frequenz f immer der gleiche Wert eingesetzt werden.

Die konventionellen 18 dB Filter bieten einen guten Kompromiß zwischen den Vor- und Nachteilen passiver Frequenzweichen. Sie sind an dieser Stelle all denen empfohlen, die wenig rechnen und experimentieren wollen. (Zu den Allpaß-Filtern 2ter und 4ter Ordnung kommen wir noch.)

Filter 4ter Ordnung (Bild 3.13) weisen eine Sperrwirkung von 24 dB/Okt auf. Sie reduzie-

Bild 3.12. Die Schaltung eines 18 dB Filters.

Bild 3.13. Die Schaltung eines 24 dB Filters.



ren die Interferenzeffekte und die Belastung der Chassis auf ein Minimum.

In einigen Fällen sind die Hochpässe mit zwei Bauteilen geradezu simpel aufzubauen, da das Chassis mit in die Frequenzweichenberechnung einbezogen werden kann. Lediglich die Tiefpässe erfordern immer mindestens vier Bauteile, auch wenn durch die Induktivität der Schwingspule bereits ein Tiefpaß erster Ordnung vorhanden ist. In den anderen Fällen wird der Bauteilaufwand etwas höher, besonders bei Mehrwege-Boxen; deshalb lohnt sich der Aufwand nur bei entsprechend teureren Chassis. (Sie sollten übrigens immer die Werte für alle Bauteile so exakt wie möglich einhalten, damit es bei den vielen Bauteilen im Filter nicht zu unkontrollierten Resonanzen kommen kann.) Das Impulsverhalten ist leider auch hier nicht gerade ideal und elektronisch nicht leicht zu korrigieren. Was also spricht jetzt für den Einsatz dieser meist sehr aufwendigen 24 dB-Weichen?

Antwort: Gutes Amplitudenverhalten und große Sperrwirkung, so daß die Interferenzeffekte minimal bleiben. Daneben werden in den Chassis weniger Partialschwingungen ange-regt. Gutes Amplitudenverhalten und geringe Interferenzeffekte zählen bei der heute üblichen Wiedergabe über zwei Stereoboxen sehr viel. In vielen Untersuchungen wurde festgestellt, daß Phasenfehler keinen hörbaren Ein-fluß auf die Wiedergabequalität haben, wenn sie sich in bestimmten Grenzen halten (Blauert Kriterium) und auch nicht das Amplitudenver-halten beeinflussen.

Aus diesem Grund kann man den Bessel- und Butterworth Filtern 4ter Ordnung ebenso wie den Allpaß-Filtern 3ter und 4ter Ordnung eine sehr gute Hifi-Tauglichkeit zuschreiben. (Bei einem Versuch mußte die Filtergüte eines 24 dB Butterworth-Filters auf 2,0 angehoben werden, bevor eine Klangveränderung durch das Überschwingen des Filters feststellbar wurde.)

Alle Untersuchungen wurden aber mit Stereo-boxen und konventionellem Musikmaterial ge-macht. Es gibt deshalb keine Aussagen darüber was passiert, wenn Aufnahmen aller-höchster Qualität über weniger oder mehr als zwei Boxen abgestrahlt werden; z.B. mit einer zusätzlichen Mittenbox oder einer Interferenz-lautsprecherbox, die Stereowiedergabe mit nur einer Box ermöglicht. Während das Gehör bei der Stereowiedergabe über zwei Boxen die

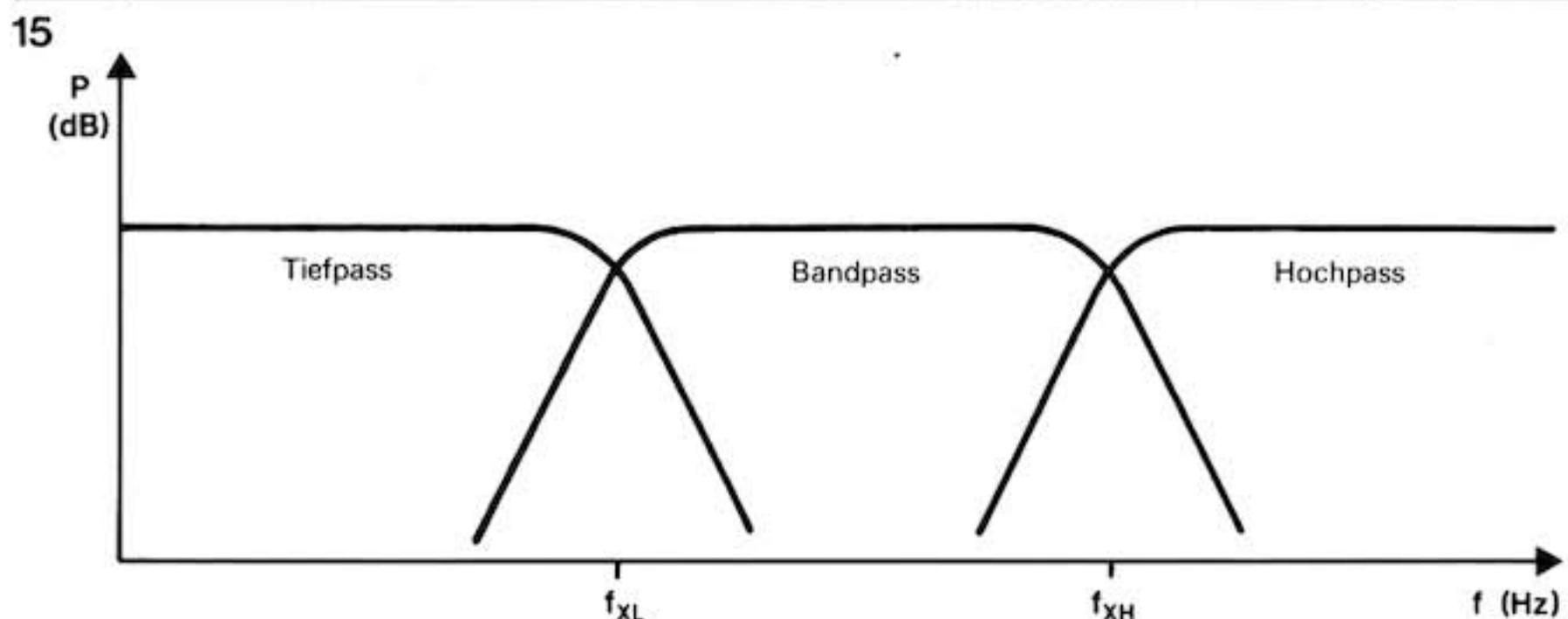
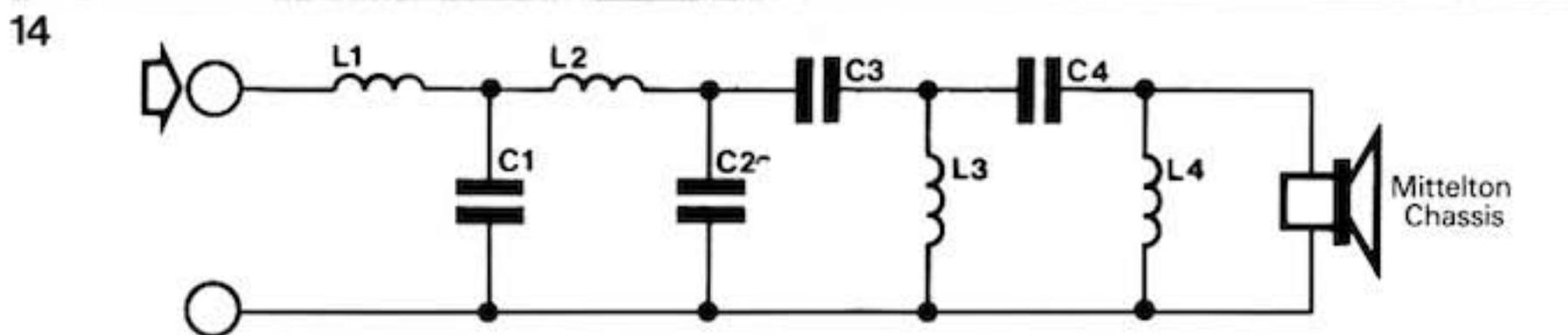


Bild 3.14. Bandpaßfilter 4ter Ordnung.

Bild 3.15. Amplitudenverlauf für einen Bandpaß nach Bild 3.14.

Informationen über die räumliche Position reproduzierter Schallquellen hauptsächlich aus der Signalamplitude berechnet, deshalb auf möglichst gleichmäßig abstrahlende Boxen angewiesen ist, kann bei anderen Tonträgern und/oder Wiedergabeanlagen Linear-Phase-Response durchaus interessant werden. Ein Beispiel dafür ist das Interferenzlautsprecher-system, das Stereoortung ermöglicht, obwohl nur eine Lautsprecherbox im Raum aufgestellt ist. Hier bilden sich je nach Amplitude und Phase der abgestrahlten Schallsignale virtuelle Schallquellen im Raum, wobei eine Ortung sogar in der Raumtiefe möglich wird.

Es ist daher mit Sicherheit kein Fehler, wenn eine Lautsprecherbox neben der Amplitude auch die Phasenlage der Signale richtig überträgt. Das ist jedoch schwer zu realisieren. Einerseits müssen alle Einflüsse der Chassis minimiert werden, um die richtige Übertragungsfunktion zu erzielen, andererseits müssen die Chassis von höchster Qualität sein, damit die Signale nicht später noch durch Ver-

zerrungen der Chassis verfälscht werden. Vor der Frage, welchen Ärger jetzt ein Chassis an einer Frequenzweiche verursachen kann und wie das zu verhindern ist, noch einige Worte zu den Allpaß-Filtern. Bei diesen Filtern ist die Phasenlage zwischen den Chassis immer konstant. Damit ist die Forderung nach gleichmäßiger und unhörbarer Änderung der Phasenlage besser erfüllt als bei konventionellen Filtern 2ter und 4ter Ordnung. Allpaß-Filter haben in industriell gefertigten 2-Wege-Lautsprecherboxen sehr weite Verbreitung gefunden. Seltener sind allerdings 3-Wege-Allpaß-Filter, denn die Berechnung ist sehr aufwendig. Während bei üblichen Filtern einfach ein Hoch- und Tiefpaß zu einem Bandpaß zusammengeschaltet werden kann, muß bei Allpaß-Filtern etwas mehr gerechnet werden. Achtung: Das gilt auch beim Zusammenschalten käuflicher Allpaß-Filter; ab der 3-Wege-Kombination ist die Allpaß-Charakteristik nicht mehr perfekt realisiert. Das trifft ebenfalls für aktive Allpaß-Filter zu! Wenn Sie diese Filter (die Sie auch fertig aufgebaut kaufen können) hintereinander schalten, um ein Bandpaß-Filter zu realisieren (Bild 3.14), wird die Allpaß-Charakteristik gestört.

Die Filter-Tabelle zeigt die normierten Werte

für Frequenzweichenbauteile. Sie können die Werte für eine bestimmte Trennfrequenz und für eine bestimmte Anschlußimpedanz errechnen. Dazu werden alle Induktivitätswerte L mit einem bestimmten Faktor multipliziert und alle Kapazitätswerte C durch einen bestimmten Faktor dividiert. Der Faktor für L ist:

$$L_{\text{Weiche}} = L_{\text{normiert}} \cdot \frac{Z}{2\pi \cdot f_{-3\text{dB}}}$$

Für C lautet der Faktor:

$$C_{\text{Weiche}} = C_{\text{normiert}} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{-3\text{dB}} \cdot Z}$$

Z = Chassisimpedanz bei der Frequenz $f_{-3\text{dB}}$ (siehe Impedanzkurve). Ersatzweise kann für Z der Wert R_{dc} eingesetzt werden.

Filter-Tabelle für L1, C1, L2, C2, L3, C3, L4 und C4

Butterworth Filter

n = 1	1,000	1,000							
n = 2	1,414	0,707	1,414	0,707					
n = 3	1,500	0,667	0,750	1,333	0,500	2,000			
n = 4	1,531	0,650	0,630	1,577	1,082	0,920	2,610	0,383	
	L1	C1	L2	C2	L3	C3	L4	C4	

Bessel Filter

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

Tschebycheff Filter

n = 2	1,303	0,768	0,839	1,191					
n = 3	1,652	0,605	0,685	1,460	1,108	0,903			
n = 4	1,377	0,726	0,488	2,051	1,517	0,659	0,887	1,127	

Linkwitz Filter: Allpaß-Charakteristik

n = 2	2,000	0,500	2,000	0,500					
n = 4	1,886	0,530	0,629	1,591	0,942	1,061	2,828	0,354	

Equal Compromise Filter nach R. M. Bullock

n = 2	1,682	0,595	1,682	0,595					
n = 4	1,702	0,588	0,635	1,576	1,012	0,988	2,714	0,369	

Filler Driver: Butterworth-Charakteristik

n = 2	1,414	0,707	1,414	0,707					
	L-Fil.	0,707	C-Fil.	1,414					
n = 3	1,500	0,667	0,750	1,333	0,500	2,000			
	L-Fil.	1,000	C-Fil.	1,000					

Der Schallpegel des Filler-Drivers muß 6 dB über dem der Tiefton- und Hochtonchassis liegen (nur für n = 3).

n = Filterordnung:

n = 1 steht für ein Filter mit 6 dB/Okt;

n = 2 steht für ein Filter von 12 dB/Okt. usw.

Allpaß-Filter für 3-Wege Frequenzweichen

Da Sie auf der Suche nach gut klingenden Frequenzweichen bei 3-Wege Boxen diese Filter in Erwägung ziehen sollten, einige Worte zur Berechnung. Um die Allpaß-Charakteristik zu erhalten, müssen die Werte aller Bauteile auf die Bandbreite des Bandpasses für das Mitteltonchassis abgestimmt werden. Dazu muß man die geometrische Mittenfrequenz des Bandpasses aus unterer und oberer Grenzfrequenz kennen:

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o}$$

Weiter sind die normierten Trennfrequenzen R und r wichtig:

$$R = \frac{f_o}{f_m}$$

$$r = \frac{f_u}{f_m}$$

Für das Filter 2ter Ordnung berechnen wir den Koeffizienten a:

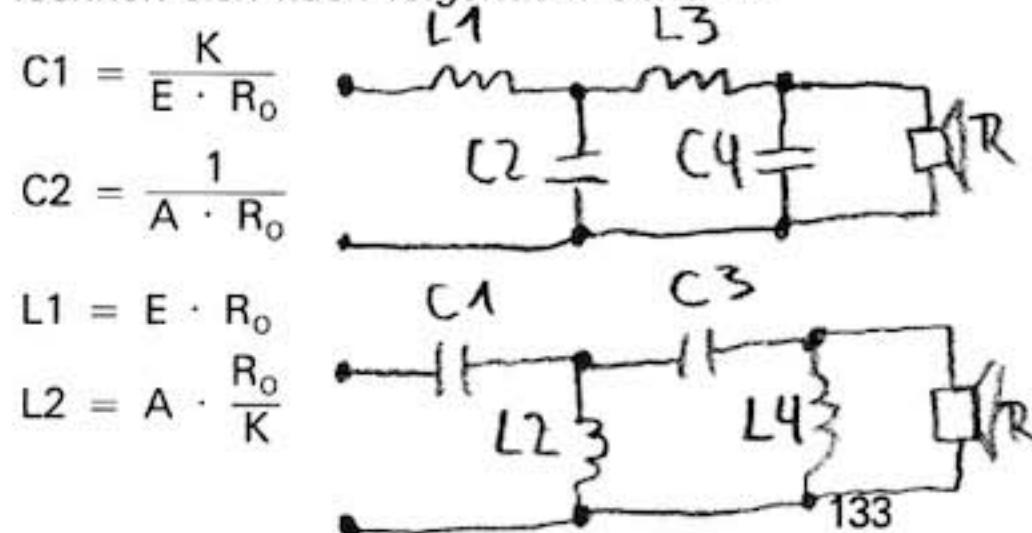
$$a = \frac{2(R^2 - 1)}{R \cdot \sqrt{R^2 - 2}}$$

Für den Tief- und Hochpaß der Frequenzweiche ist jetzt:

$$L_{\text{normiert}} = a$$

$$C_{\text{normiert}} = \frac{1}{a}$$

Beispiel: Für $R = 2$ (entsprechend $f_u = 1000$ Hz, $f_o = 4000$ Hz und $f_m = 2000$ Hz) sind die normierten Werte für $L = 2,121$ und für $C = 0,471$. Den entsprechenden Tief- und Hochpaß sehen wir in Bild 3.15a. Beim Tiefpaß ist der Kondensator zum Signal parallel geschaltet, beim Hochpaß ist es die Spule. Die normierten Werte für den Bandpaß errechnen sich nach folgendem Schema:



Dabei gilt für die Koeffizienten A, Ro, K und E:

$$A = a (R + r)$$

$$K = B - 1$$

$$B = r^2 + a^2 + R^2$$

$$E = A - \frac{A}{K}$$

$$R_o = R_{an} + 1$$

$$R_{an} = \frac{K}{H} - 1$$

$$H = |h| \cdot R^2$$

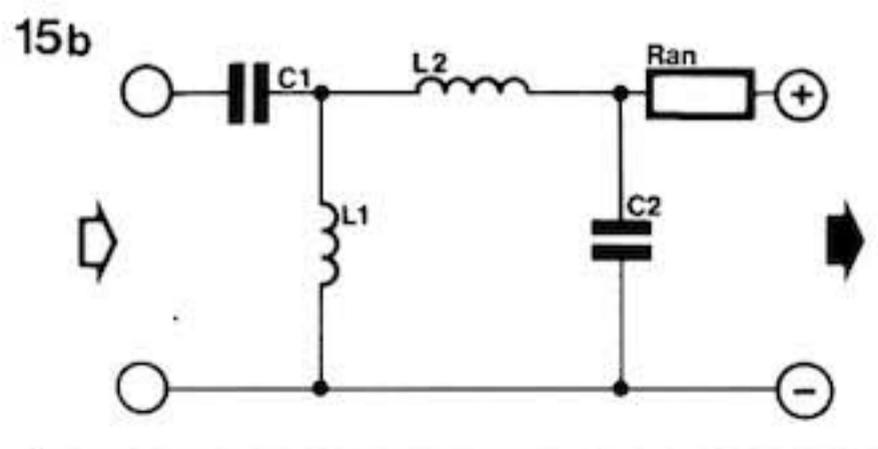
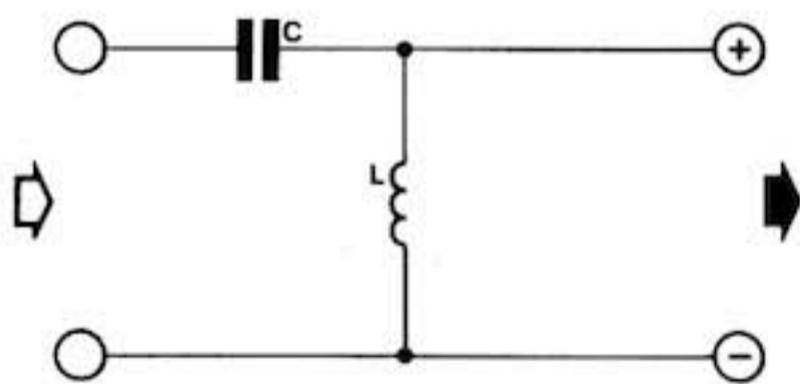
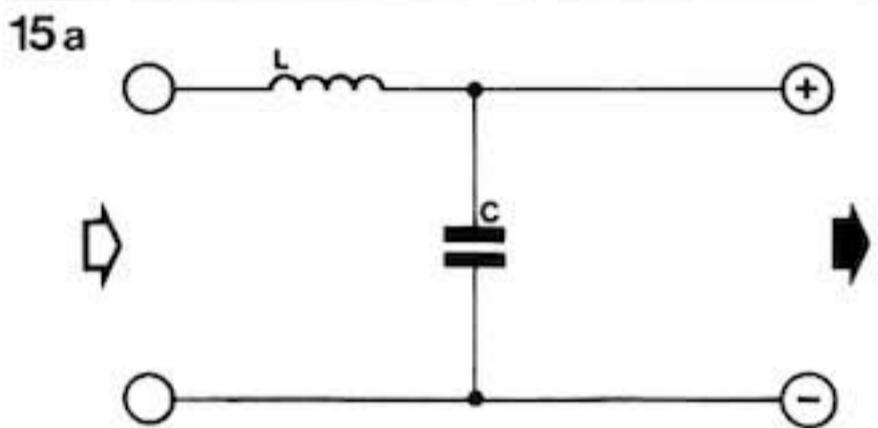
$$h = -(1 + (a^2 - 4) \cdot r^2 + 3r^4)$$

Die Anordnung von C 1, C2, L1, L2 und Ran im Bandpaß zeigt Bild 3.15b.

Alle Werte für L und C können nun wie üblich für jede Übernahme-Frequenz fx (für fu oder

Bild 3.15a.

Bild 3.15b.



fh) und jeden Abschluß-Widerstand Z (Chassisimpedanz) denormiert werden. Dazu sind bei allen Hoch- und Tiefpässen alle normierten Kondensatoren durch einen bestimmten Faktor zu dividieren und alle Spulen zu multiplizieren.

Kondensatoren: $Z \cdot 2\pi \cdot f_t$ (dividieren)

Spulen: $\frac{Z}{2\pi \cdot f_t}$ (multiplizieren)

Bei Bandpässen für Mitteltonchassis wird jetzt statt der Frequenzen fu und fh die Bandpaßmittenfrequenz fm eingesetzt.

Kondensatoren: $Z \cdot 2\pi \cdot f_m$ (dividieren)

Spulen: $\frac{Z}{2\pi \cdot f_m}$ (multiplizieren)

Der Wert für Z errechnet sich in diesem Fall aus der Chassis-Impedanz Z und dem Vorwiderstand Ran; es ist die Summe aus beiden Werten. Das gilt auch für die folgenden Bandpässe höherer Ordnung!

Der Anschluß des Chassis am Bandpaß erfolgt mit vertauschter Polarität: Pluspol Chassis an Minuspol Weiche!

Bei Filtern höherer Ordnung steigt der Rechenaufwand bereits deutlich an. Beginnen wir mit einem 18 dB Filter (n = 3 = 3te Ordnung). Die Werte für R, a, b und h entnehmen Sie der Tabelle "18 dB Filter".

Hoch- und Tiefpaß der Frequenzweiche:

$$L1l = E$$

$$E = b - \frac{1}{a}$$

$$L2l = \frac{1}{a}$$

$$C1 = \frac{a}{E}$$

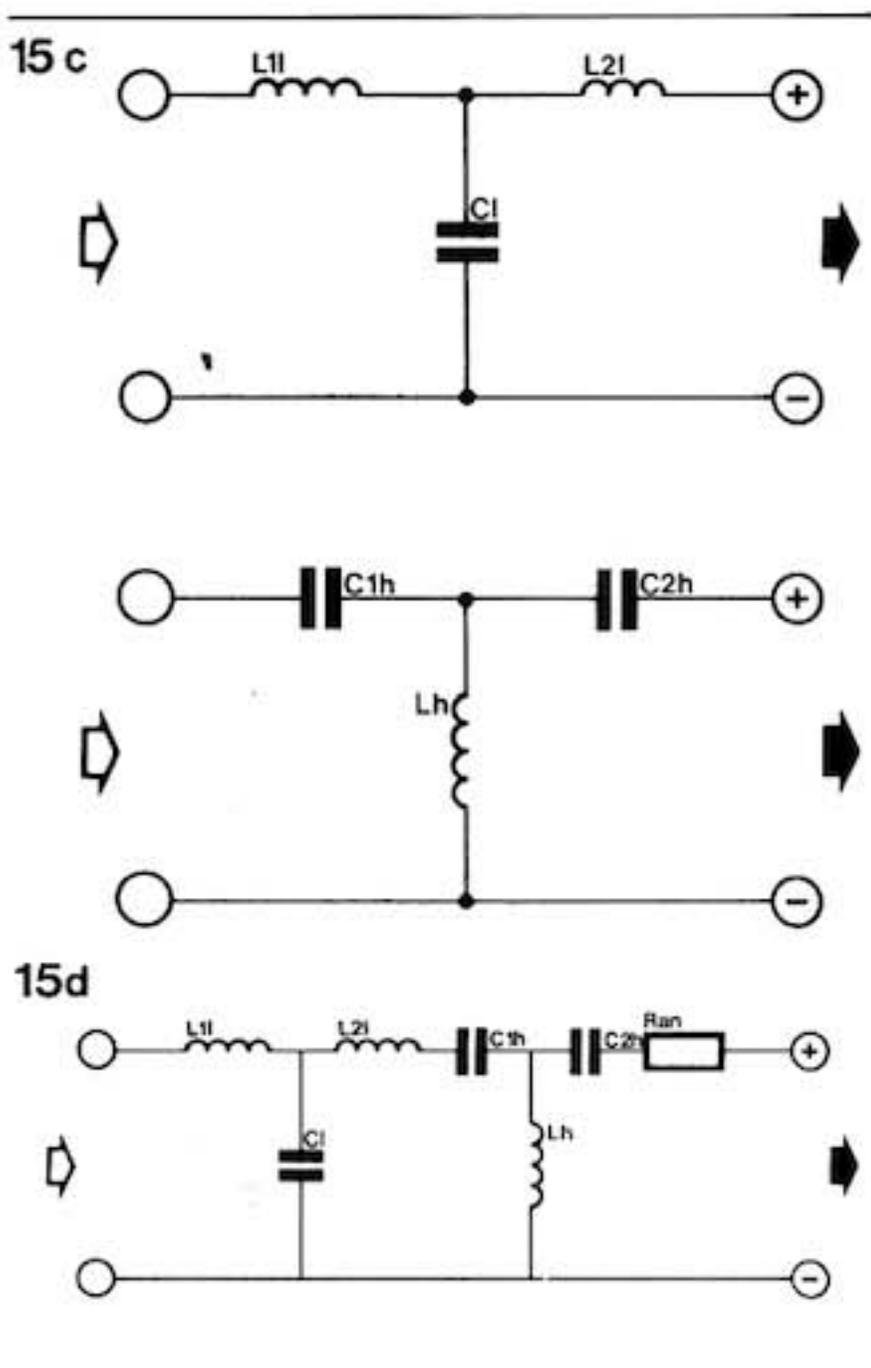
$$C1h = \frac{1}{E}$$

$$C2h = a$$

$$Lh = \frac{E}{a}$$

Die Tief- und Hochpaß-Schaltung ist in Bild 3.15c zu sehen. Bei der Bauteilbezeichnung steht der Buchstabe l für low (Tiefpaß) und h für high (Hochpaß).

Bevor die Berechnung für die Bauteile des Bandpasses 3ter Ordnung beginnt, sind noch einige Hilfwerte zu ermitteln.



Die Anordnung der Bauteile im Bandpaß sind in Bild 3.15d gezeichnet.

Die Tabelle (nach R.M. Bullock III) zeigt den Unterschied in den Bauteilwerten für Allpaß-Filter mit Bandpaß gegenüber 2-Wege Allpaß-

$$L1l = M \frac{R_0}{K}$$

$$L2l = \frac{R_0}{F}$$

$$C1 = \frac{F}{M \cdot R_0}$$

$$C1h = \frac{K}{E \cdot R_0}$$

$$C2h = \frac{A}{R_0}$$

$$Lh = E \frac{R_0}{A}$$

Tabelle für Allpaß-Filter 3ter Ordnung (18 dB).

R	a	b	h
1,4	1,4794	1,7201	0,9988
1,5	1,5261	1,7470	0,9973
1,6	1,5683	1,7711	0,9962
1,7	1,6064	1,7924	0,9956
1,8	1,6405	1,8113	0,9956
1,9	1,6710	1,8381	0,9958
2,0	1,6983	1,8430	0,9963
2,1	1,7228	1,8562	0,9968
2,2	1,7442	1,8679	0,9971
2,3	1,7646	1,8784	0,9975
2,4	1,7817	1,8877	0,9979
2,5	1,7975	1,8961	0,9982
2,6	1,8118	1,9036	0,9985
2,7	1,8246	1,9103	0,9987
2,8	1,8363	1,9164	0,9989
2,9	1,8468	1,9219	0,9990
3,0	1,8564	1,9269	0,9992
3,2	1,8732	1,9355	0,9994
3,4	1,8872	1,9428	0,9996
3,6	1,8991	1,9489	0,9997
3,8	1,9092	1,9541	0,9998
4,0	1,9179	1,9585	0,9998
4,2	1,9254	1,9623	0,9999
4,4	1,9319	1,9657	0,9999
4,6	1,9370	1,9686	0,9999
4,8	1,9427	1,9711	0,9999
5,0	1,9471	1,9733	0,9999

Bild 3.15c.

Bild 3.15d.

$$E = B - \frac{C}{A}$$

$$F = A - \frac{A}{E}$$

$$K = C - \frac{A \cdot (B-1)}{E}$$

$$M = B - 1 - \frac{K}{F} - \frac{E \cdot F}{K}$$

$$R_{an} = \frac{K}{H} - 1$$

$$R_0 = 1 + R_{an}$$

$$A = b \cdot R + a \cdot r$$

$$B = a \cdot R^2 + a \cdot b + b \cdot r^2$$

$$C = R^3 + a^2 \cdot R + b^2 \cdot r + r^3$$

$$H = |h| \times R^3$$

Filtern im Wertebereich für a. Abhängig von der Bandpaßbreite R nähert sich a dem Wert 2,000; dieser Wert wäre für 2-Wege Allpaß-Filter richtig (und steht daher bereits weiter oben in der allgemeinen Tabelle zur Frequenzweichenberechnung). Für das Allpaß-Filter 4ter Ordnung ist die Berechnung noch etwas komplizierter. Die Werte für R, a, b, c und h entnehmen Sie der Tabelle 2. Beginnen wir mit den Bauteilwerten für den Tief- und Hochpaß.

$$E = b - \frac{c}{a}$$

$$F = c - \frac{a}{E}$$

$$L1l = F$$

$$L2l = \frac{a}{E}$$

$$C1l = \frac{E}{F}$$

$$C2l = \frac{1}{a}$$

$$C1h = \frac{1}{F}$$

$$C2h = \frac{E}{a}$$

$$L1h = \frac{F}{E}$$

$$L2h = a$$

Den Tief- und Hochpaß sehen Sie in Bild 3.15e.

Bild 3.15e.

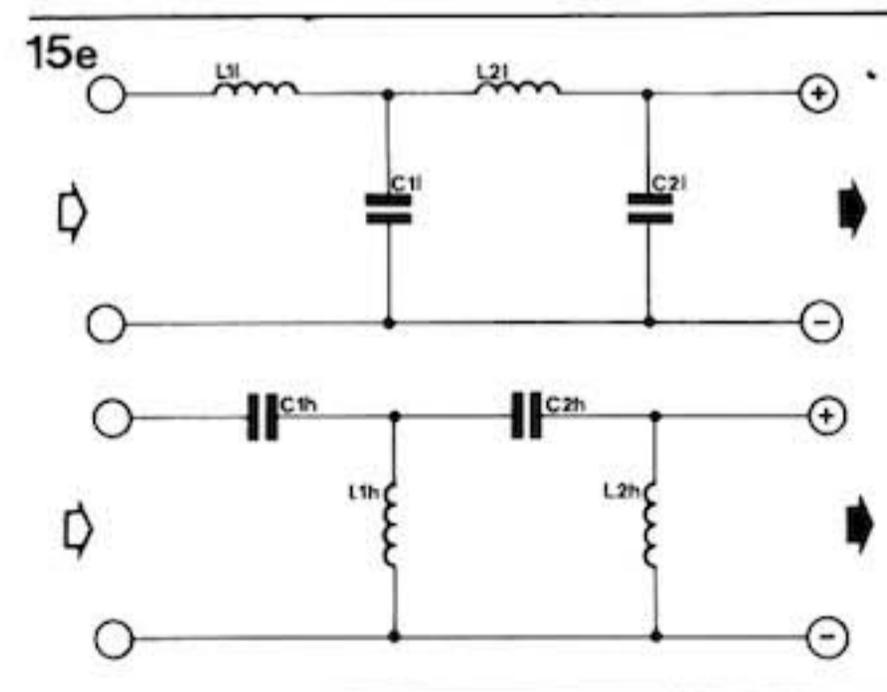


Tabelle nach R.M. Bullock III. Allpaß-Filter 4ter Ordnung

R	a	b	c	h
1,4	2,4304	3,7515	2,7392	1,3120
1,5	2,5051	3,7544	2,7402	1,1440
1,6	2,5651	3,7816	2,7501	1,0726
1,7	2,6130	3,8126	2,7614	1,0382
1,8	2,6512	3,8415	2,7718	1,0247
1,9	2,6819	3,8666	2,7809	1,0114
2,0	2,7066	3,8879	2,7885	1,0064
2,1	2,7766	3,9056	2,7948	1,0037
2,2	2,7428	3,9202	2,8001	1,0021
2,3	2,7561	3,9323	2,8044	1,0012
2,4	2,7669	3,9423	2,8080	1,0007
2,5	2,7758	3,9506	2,8109	1,0004
2,6	2,7832	3,9575	2,8134	1,0002
2,7	2,7894	3,9633	2,8154	1,0001
2,8	2,7946	3,9681	2,8171	1,0001
2,9	2,7989	3,9722	2,8186	1,0000
3,0	2,8026	3,9757	2,8198	1,0000
3,2	2,8084	3,9811	2,8217	1,0000
3,4	2,8127	3,9852	2,8232	1,0000
3,6	2,8159	3,9882	2,8242	1,0000
3,8	2,8183	3,9905	2,8251	1,0000
4,0	2,8202	3,9922	2,8257	1,0000
4,2	2,8216	3,9936	2,8262	1,0000
4,4	2,8228	3,9947	2,8265	1,0000
4,6	2,8237	3,9955	2,8269	1,0000
4,8	2,8244	3,9962	2,8271	1,0000
5,0	2,8250	3,9968	2,8273	1,0000

Für den Bandpaß 4ter Ordnung gilt jetzt:

$$E = B - \frac{C}{A}$$

$$F = D - \frac{C}{A}$$

$$M = B - 1 - E \frac{L}{G}$$

$$G = C - \frac{A \cdot F}{E}$$

$$J = C - \frac{A (B-1)}{E}$$

$$K = F - \frac{J \cdot E}{G}$$

$$L = A - \frac{A}{E}$$

$$N = J - \frac{G \cdot M}{K}$$

$$P = L - \frac{G}{K}$$

$$Q = M - \frac{N}{P}$$

$$T = N - \frac{P \cdot K}{Q}$$

$$A = c \cdot R + a \cdot r$$

$$B = b \cdot R^2 + a \cdot c + b \cdot r^2$$

$$C = a \cdot R^3 + a \cdot b \cdot R + b \cdot c \cdot r + c \cdot r^3$$

$$D = R^4 + a^2 \cdot R^2 + b^2 + c^2 \cdot r^2 + r^4$$

$$H = |h| R^4$$

$$L1l = G \frac{R_0}{K}$$

$$L2l = A \frac{R_0}{E}$$

$$C1l = \frac{E}{G \cdot R_0}$$

$$C2l = \frac{1}{A \cdot R_0}$$

$$C1h = \frac{K}{R_0 \cdot T}$$

$$C2h = \frac{Q}{P \cdot R_0}$$

$$L1h = T \frac{R_0}{Q}$$

$$L2h = P \cdot R_0$$

$$R_{an} = \frac{K}{H} - 1$$

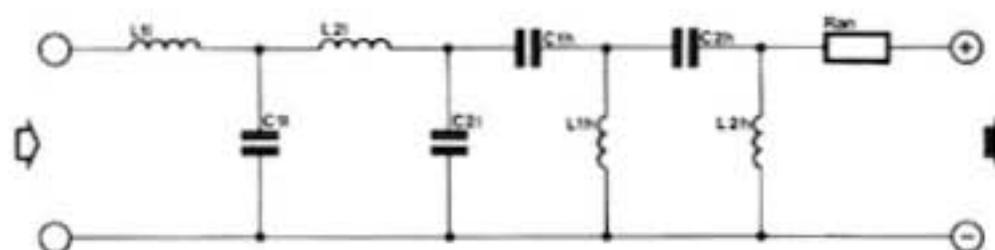
$$R_0 = 1 + R_{an}$$

Der Bandpaß 4ter Ordnung (Bild 3.15f) ist praktisch eine Reihenschaltung von Tief- und Hochpaß.

Wie Sie sehen, können Sie sich auf einigen Rechenaufwand einstellen. Das läßt sich bei der Verwendung von Allpaß-Filtern in 3-Wege

Bild 3.15f.

15f



86902-15.1

Kombinationen leider nicht vermeiden.

Noch ein abschließendes Wort zu R_{an} , dem Vorwiderstand, der in manchen Fällen Werte von 2 Ohm und mehr aufweisen kann. Es ist natürlich möglich, Chassis mit geringerem Wirkungsgrad zu verwenden und den Widerstand wegzulassen oder zu verkleinern. Das Mitteltonchassis kann also einen geringeren Wirkungsgrad haben als das Hoch- und Tief- tonchassis. Für $R_{an} = 2$ Ohm und einer Chassis-Impedanz Z von 8 Ohm kann das Mitteltonchassis zum Beispiel um knapp 2 dB leiser als die anderen Chassis sein. Überschlägige Berechnung:

$$\text{Schallpegeldifferenz in dB} = 20 \log \left(\frac{Z + R_{an}}{Z} \right)$$

Bei der Berechnung der Weichenbauteile für den Bandpaß wird in diesem Fall mit der Chassis-Impedanz Z gerechnet, nicht mit R_0 . Diese Allpaß-Filter haben bei richtiger Dimensionierung eine konstante Phasenlage zwischen den einzelnen Chassis. Damit ist zwar eine Forderung nach Linear-Phase Wiedergabe nicht zu erfüllen, aber das Allpaß-Filter realisiert zumindest eine optimierte Schallabstrahlung, da sich die Hauptabstrahlrichtung nicht frequenzabhängig verlagert. Wenn die akustischen Zentren der Chassis exakt übereinander angeordnet sind, dann ist die optimale Hörposition in der Höhe zwischen Mittel- und Hochton-Chassis. Wenn das Mitteltonchassis nicht gerichtet abstrahlt, dann kann die Abstrahlachse natürlich durch ein zurückversetztes Hochtonchassis nach oben geneigt werden; ebenso durch ein vorgesetztes Hochtonchassis nach unten, was bei hoch angebrachten Regalboxen schon einmal nötig werden kann.

Soweit zur Theorie der Frequenzweichen, zurück zur Praxis. Lautsprecherchassis sind keine reellen Widerstände, wie wir bei der Bauteildimensionierung von Frequenzweichen angenommen haben. Im Gegenteil, es sind durch Gegeninduktion und Induktivität der Schwing-

spule sehr komplexe Abschlußwiderstände. Die Induktivität der Schwingspule bewirkt bei hohen Frequenzen eine Reduzierung der abgestrahlten Leistung. Damit ist bereits eine 6 dB Weiche in das Chassis eingebaut, die nur zu gerne übersehen wird). Wer die -3 dB Frequenz sucht, findet sie mit folgenden Formeln:

$$Q_{vc} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot L_{vc}}{R_{dc}}$$

$$f_{-3\text{ dB}} = f_s \frac{1}{Q_{vc}}$$

Bei der -3 dB Frequenz wird nur noch die halbe Leistung vom Chassis abgestrahlt. An den Schalldruckkurven (Bild 3.16) ist das aber nicht immer sehen, da die Kurve durch Bündelungseffekte auf Achse weiter linear verlaufen kann. Das ist eine Tatsache, die bei der Dimensionierung einer Frequenzweiche zu beachten ist, denn sonst nützt die beste Berechnung nichts.

Schalten Sie beispielsweise eine Spule vor das Chassis (also einen 6 dB Tiefpaß), dann ad-

Bild 3.16. Nur wenn der -3 dB Punkt der Schalldruckkurve bei der Frequenz liegt, bei der sie die doppelte Nennimpedanz Z_{min} messen, ist ein Impedanzequalizing bei 6 dB Weichen nicht notwendig. Durch Bündelungseffekte kann der Schalldruck über den Punkt Z_{-3} hinaus linear verlaufen.

diert sich die Induktivität der Schwingspule immer zu dem Wert der vorgeschalteten Induktivität. Hatte das Chassis einen -3 dB Punkt bei der errechneten -3 dB Frequenz, dann verschiebt sich dieser Punkt durch die vorgeschaltete Spule nach der Gesetzmäßigkeit folgender Formel:

$$Q'_{vc} = \frac{(L1 + L_{vc}) \cdot 2\pi \cdot f_s}{R_{dc}}$$

$$f'_{-3\text{ dB}} = f_s \frac{1}{Q'_{vc}}$$

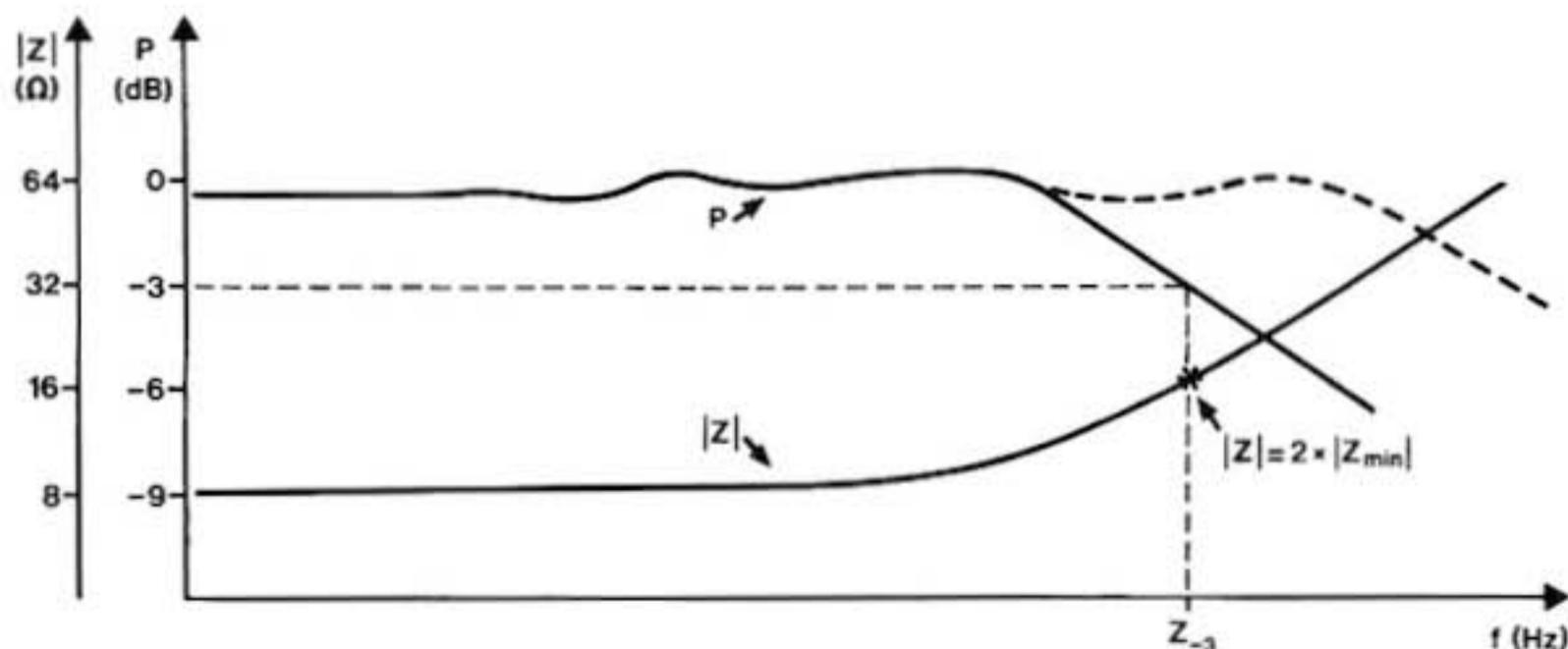
Anders ausgedrückt: Ergeben beide Induktivitäten zusammen den errechneten Wert, dann liegt der -3 dB Punkt bei der gewünschten Frequenz.

Ist der Schalldruckverlauf des Chassis aber über die errechnete -3 dB Frequenz hinaus linear (durch Bündelung oder Verringerung der bewegten Masse), dann wird es schwieriger. In diesem Fall muß man die Spuleninduktivität kompensieren. Dazu ist ein Widerstand mit Kondensator parallel zur Schwingspule zu schalten (Bild 3.17). Die Bauteilwerte errechnen sich nach den Formeln:

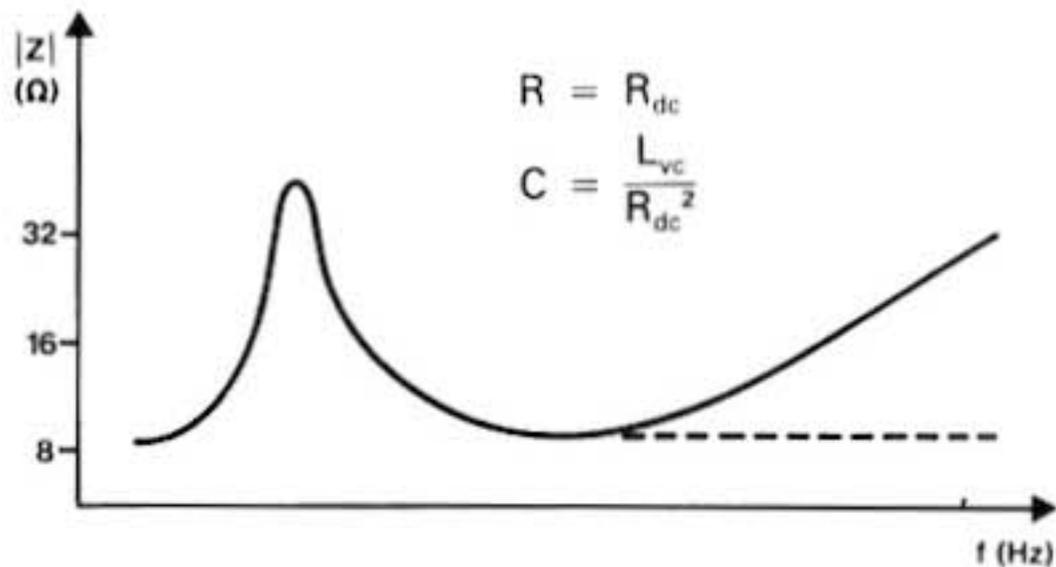
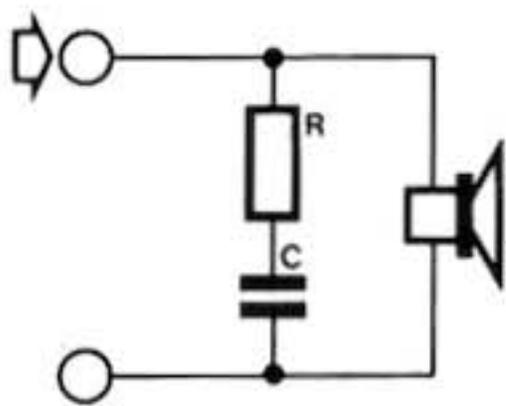
$$R = R_{dc}$$

$$C = \frac{L_{vc}}{R_{dc}^2}$$

16



17



18

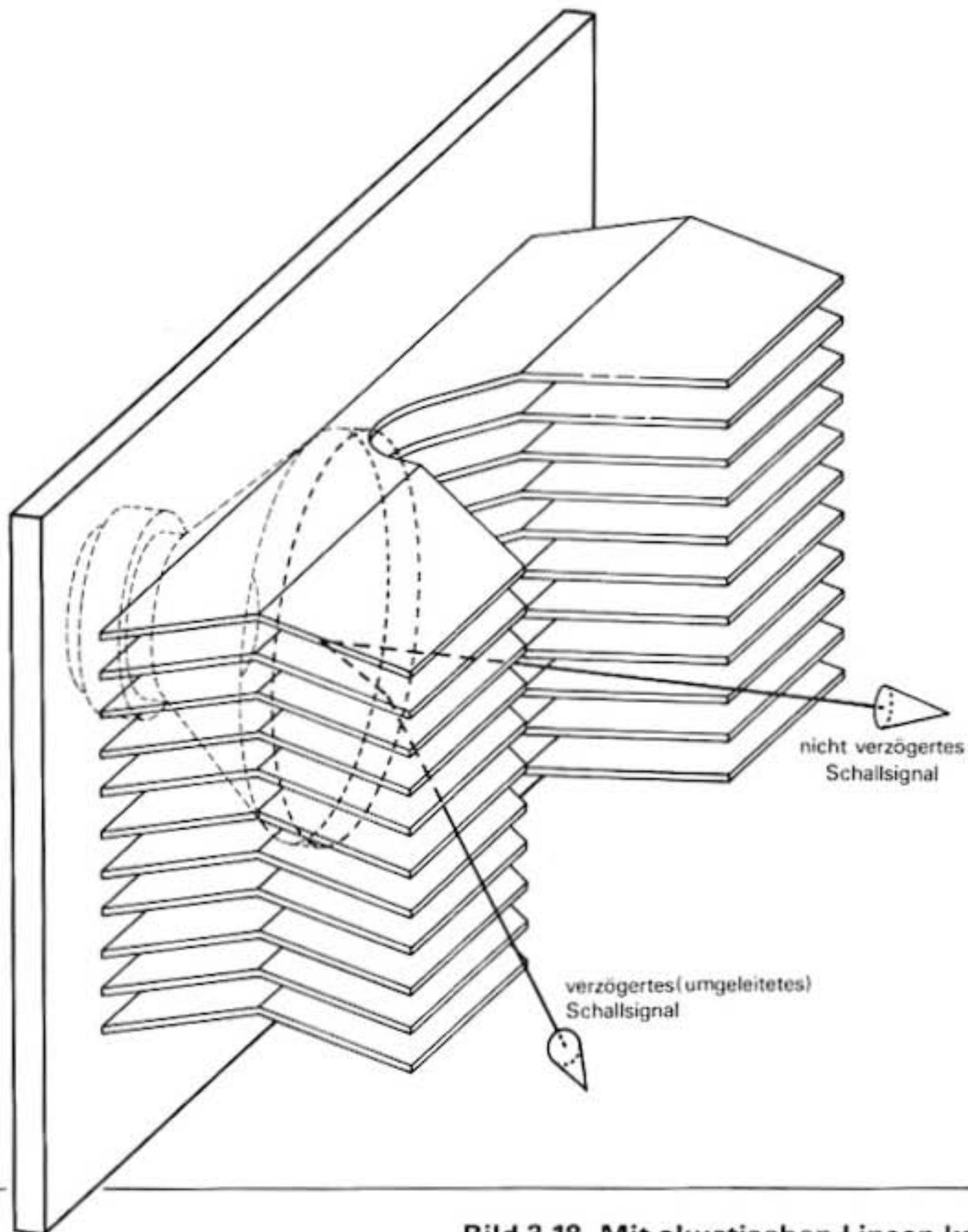
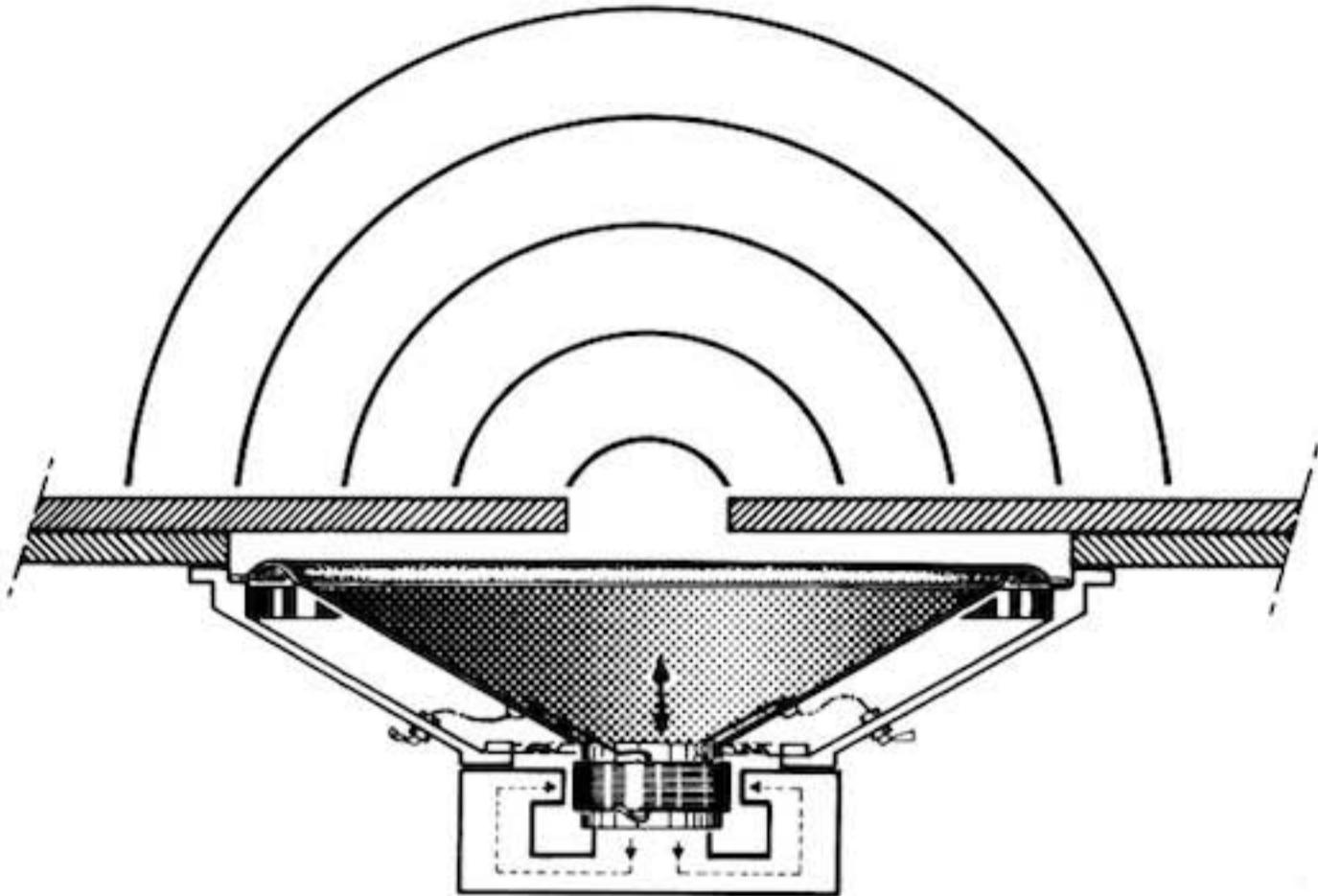


Bild 3.17. Ein Impedanzequalizing zur Korrektur der Induktivität der Schwingspule.

Bild 3.18. Mit akustischen Linsen kann die Schallbündelung der Lautsprechermembran verringert werden.



86902-3-19

Bild 3.19. Auch ein Beugungsspalt kann zur Verbesserung der Abstrahlcharakteristik beitragen. Hierbei sind aber immer einige Experimente notwendig, da es zu Resonanzen der Feder Luft vor der Membran und Masse Luft im Beugungsspalt kommen kann.

Nach dieser Maßnahme kann man eine Spule mit dem berechneten Wert vorschalten und der Schalldruckverlauf auf Achse ist wie erwartet. Nur, da das Equalizing nichts an der vom Chassis abgestrahlten Leistung ändert (diese bestimmt nur der Strom durch die Schwingspule), kann es bei Chassis, die Bündelungseffekte zeigen, zu einer Reduzierung der abgestrahlten akustischen Leistung kommen. Das Chassis strahlt dann bei der gewünschten Übernahmefrequenz nach vorne mit -3 dB, aber zur Seite bereits mit -6 dB (nur als Beispiel) ab. Es ist daher sinnvoll, die Übernahmefrequenzen nicht zu hoch anzusetzen. Um ganz sicher zu sein, benötigen Sie natürlich Schalldruckkurven für mehrere Raumwinkel. Bei Chassis, die auf Achse einen Schalldruckanstieg zeigen, ist es oft möglich, den Abstrahlwinkel durch akustische Linsen zu verbreitern (Bild 3.18).

Gegenüber dem normalerweise praktizierten elektrischen Equalizing mit einer größeren vorgeschalteten Spule, ist ein akustisches Equali-

zing sinnvoller. Beim elektrischen Equalizing würde einerseits durch den hohen Wert der Induktivität einiger Ärgere bei der Suche nach dem geeigneten Hochpaß für eine Frequenzweiche entstehen. Die Übertragungsfunktion für den Hochpaß müßte die tatsächliche Trennfrequenz für den hohen Induktivitätswert berücksichtigen. Andererseits reduziert die zu große Spule die vom Chassis abgestrahlte akustische Leistung bei höheren Frequenzen. Der Vorteil des akustischen Equalizing ist die verbesserte Wiedergabe auf Achse und das verbesserte indirekte Schallfeld. In diesem Fall wird die zuviel nach vorne abgestrahlte Schallenergie zur Seite abgelenkt.

Es ist aber auch noch anderer Ärger denkbar. Schaltet man z.B. einen Kondensator vor ein Chassis, um einen 6 dB Hochpaß zu realisieren, verändert das den Verlauf der Schalldruckkurve nicht in der gewünschten Weise. (Bild 3.20). Der theoretische Verlauf, der gestrichelt gezeichnet ist, weicht doch ganz erheblich vom tatsächlichen Verlauf ab.

Wie bereits erwähnt, ist ein linearer Verlauf nur für einen bestimmten Kondensatorwert möglich (dann allerdings gleich 3ter Ordnung). Dabei ist der Wert des vorgeschalteten Kondensators relativ hoch. Die -3 dB Frequenz der Kombination Chassis/Kondensator liegt dabei unter der Resonanzfrequenz des Chassis. Die Erklärung für den Schalldruckver-

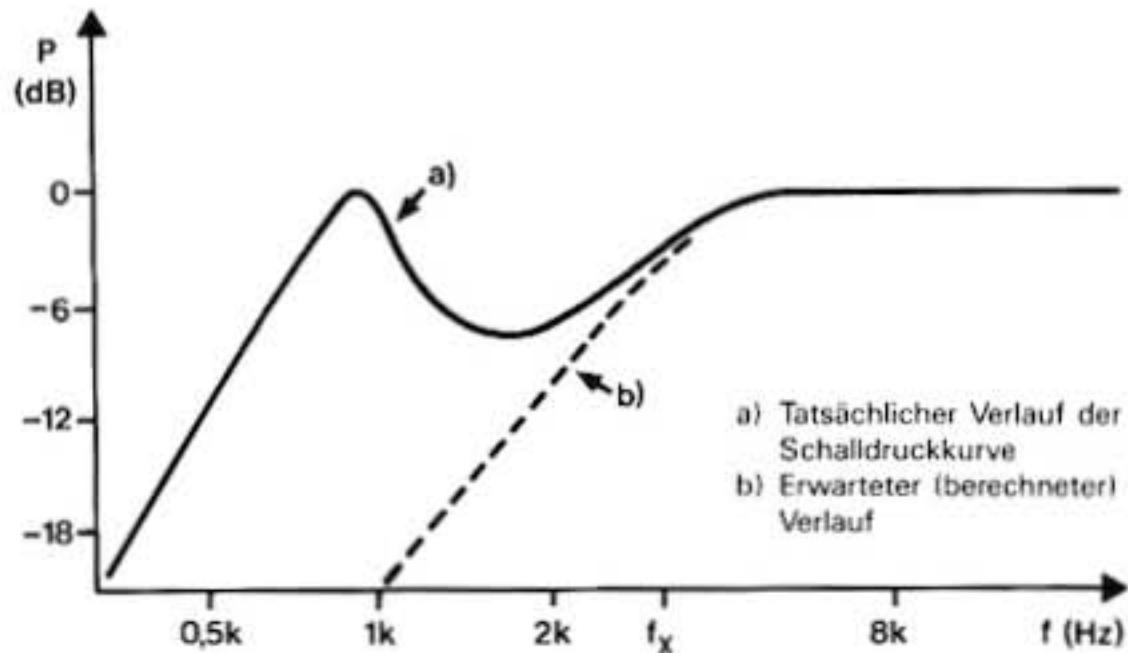


Bild 3.20. Kurve a zeigt den tatsächlichen Verlauf des Schalldrucks und Kurve b den berechneten (theoretischen).

lauf aus Bild 3.20 ist einfach zu geben. Wir wissen, daß jeder Kondensatorwert einen frequenzabhängigen Widerstand hat. Schaltet man nun einen kleinen Kondensatorwert vor das Chassis, wird dadurch ein Widerstand in Reihe zum Chassis gelegt, dessen Wert bei der Resonanzfrequenz des Chassis wesentlich größer ist als R_{dc} . Um z.B. ein Hochtonchassis mit den Daten $f_s = 800$ Hz und $R_{dc} = 5,8$ Ohm bei $f_{-3dB} = 4000$ Hz abzutrennen, benötigen Sie einen Kondensator, dessen Wert sich folgendermaßen berechnet:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 4000 \cdot 5,8} \quad C \text{ in Farad}$$

Der errechnete Wert ist 6,86 Mikrofarad. Der frequenzabhängige Widerstand dieses Kondensators ist bei 800 Hz relativ hoch, nämlich 34 Ohm. Diese 34 Ohm liegen jetzt bei der Resonanzfrequenz in Reihe zum Chassis. Das verändert die Werte von Q_e und Q_t erheblich. Wir berechnen und vergleichen sie für ein bekanntes Chassis von der Firma Audax, das Hochtonchassis HD 100 D 25. Ohne den zusätzlichen Vorwiderstand hat das Chassis laut Hersteller folgende Daten:

$$Q_m = 2,47; Q_e = 1,42 \text{ und } Q_t = 0,90.$$

Mit dem zusätzlichen Vorwiderstand ändern sich die Werte: $Q_m = 2,47; Q_e = 8,32$ und $Q_t = 1,90$.

Bei einem Chassis mit höherem Q_m -Wert ist es noch extremer. Die Daten für das Mittelton-

chassis MHD 12 D 25 FSM SQ von Audax sind: $f_s = 300$ Hz; $Z = 7,0$ Ohm; $R_{dc} = 5,3$ Ohm. Für eine Trennfrequenz von 1200 Hz hat der berechnete Kondensator einen Wert von 19 Mikrofarad; damit ist der Vorwiderstand bei der Resonanzfrequenz 28 Ohm. Unter diesen Bedingungen gilt:

$$Q_m = 4,20; Q_e = 1,40; Q_t = 1,06 \text{ ohne Vorwiderstand;}$$

$$Q_m = 4,20; Q_e = 7,40; Q_t = 2,68 \text{ mit Vorwiderstand.}$$

Anders ausgedrückt: Das Chassis wird bei der Resonanzfrequenz um 8,56 dB zu wenig abgesenkt. Der Klang ist dabei auch noch miserabel, da $Q_t = 2,68$ kein brauchbares Ausschwingverhalten mehr bietet. Dies alles liegt nicht am Hersteller und nicht am Chassis, sondern daran, daß man in die Zuleitungen von Lautsprecherchassis nicht ungestraft Widerstände legen darf, ohne sie in die Berechnungen einzubeziehen. Die Chassis von Audax wurden nur gewählt, weil hier zu guten Chassis auch gute Datenblätter vorhanden sind.

Die zusätzlichen Widerstände beeinträchtigen nur die elektrische Bremse des Chassis. Bei Chassis mit niedrigen Q_m -Werten ist die Sache unkritischer, weil Q_t nie größer als Q_m werden kann. Es besteht so die Möglichkeit, eine ausgefallene elektrische Bremse durch eine mechanische zu ersetzen, wenn zum Beispiel ein Mitteltonchassis über einen Variovent auf einen Q_m von etwa 1,0 bis 1,5 abgestimmt wird. Sie können die elektrische Bremse auch wieder in Betrieb setzen, wenn Sie einen Widerstand parallel zum Chassis schalten. Durch

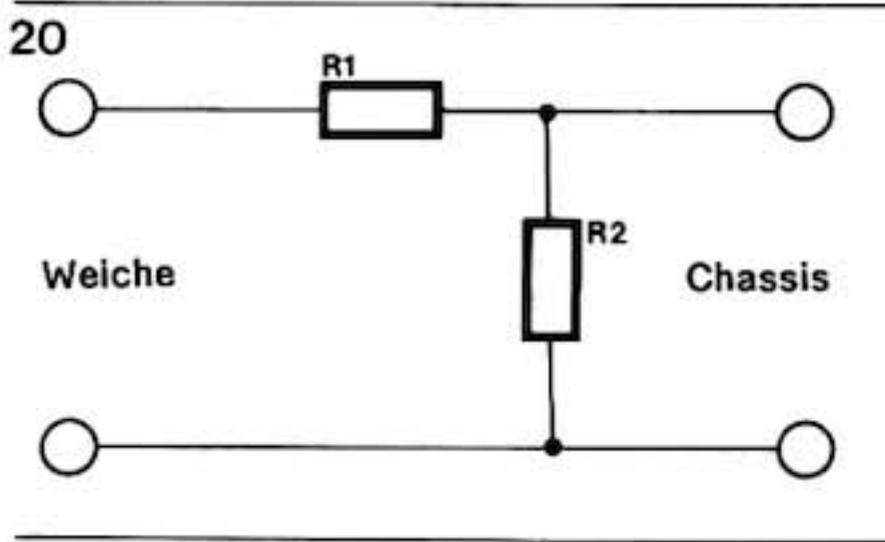


Bild 3.20a.

die Parallelschaltung ändert sich der Vorwiderstand nach der für parallelgeschalteten Widerständen bekannten Formel. Bei Hochtonchassis ist diese Lösung häufig zu sehen, der Widerstand ist dabei Teil eines Spannungsteilers zur Pegelanpassung (Bild 3.20a).

Dämpfung dB	Abs.	Z = 4 Ohm		Z = 8 Ohm		Z = 16 Ohm	
		R1	R2	R1	R2	R1	R2
-1	1,12	0,44	32,8	0,87	65,6	1,74	131,1
-2	1,26	0,82	15,5	1,64	31,0	3,28	62,0
-3	1,41	1,17	9,7	2,34	19,4	4,68	38,7
-4	1,59	1,48	6,8	2,95	13,7	5,91	27,4
-5	1,78	1,75	5,1	3,50	10,3	7,00	20,6
-6	2,00	2,00	4,0	4,00	8,0	8,00	16,1
-7	2,24	2,21	3,2	4,43	6,5	8,85	12,9
-8	2,51	2,41	2,7	4,82	5,3	9,63	10,6
-9	2,82	2,58	2,2	5,16	4,4	10,32	8,8
-10	3,16	2,74	1,9	5,47	3,7	10,94	7,4
-11	3,55	2,87	1,6	5,75	3,1	11,49	6,3
-12	3,98	3,00	1,3	5,99	2,7	11,98	5,4

(Abs. = Absenkung)

Diese Lösung ist aber nicht gerade elegant. Um nämlich einen möglichst geringen Parallelwiderstand zu realisieren, muß der Schallpegel des Chassis kräftig abgesenkt werden. Das kostet Magnetmaterial, von dem Sie später nichts haben. Eleganter ist die in Bild 3.21 gezeigte Lösung. Durch diese Schaltung wird die Impedanzkurve des Chassis zu einer geraden Linie. Das Netzwerk kompensiert sowohl die Induktivität der Schwingspule wie auch die Einflüsse der Gegeninduktion bei der Resonanzfrequenz. Bei richtiger Dimensionierung entspricht der Widerstand des Chassis jetzt einem realen Abschlußwiderstand der Frequenzweiche (der bei der üblichen Weichenberechnung vorausgesetzt wird). Diese Schaltung sollte immer ins Auge gefaßt

werden, wenn man Wechselwirkungen zwischen Frequenzweiche und Chassis vermeiden will. Allerdings muß dafür genau gemessen werden, was die entsprechenden Geräte (Kapitel 6) voraussetzt.

Die Werte der einzelnen Bauteile errechnen sich nach den folgenden Formeln:

$$R1 = R_{dc}$$

$$R2 = \frac{Q_e \cdot R_{dc}}{Q_m}$$

$$C1 = \frac{L_{vc}}{R_{dc}^2}$$

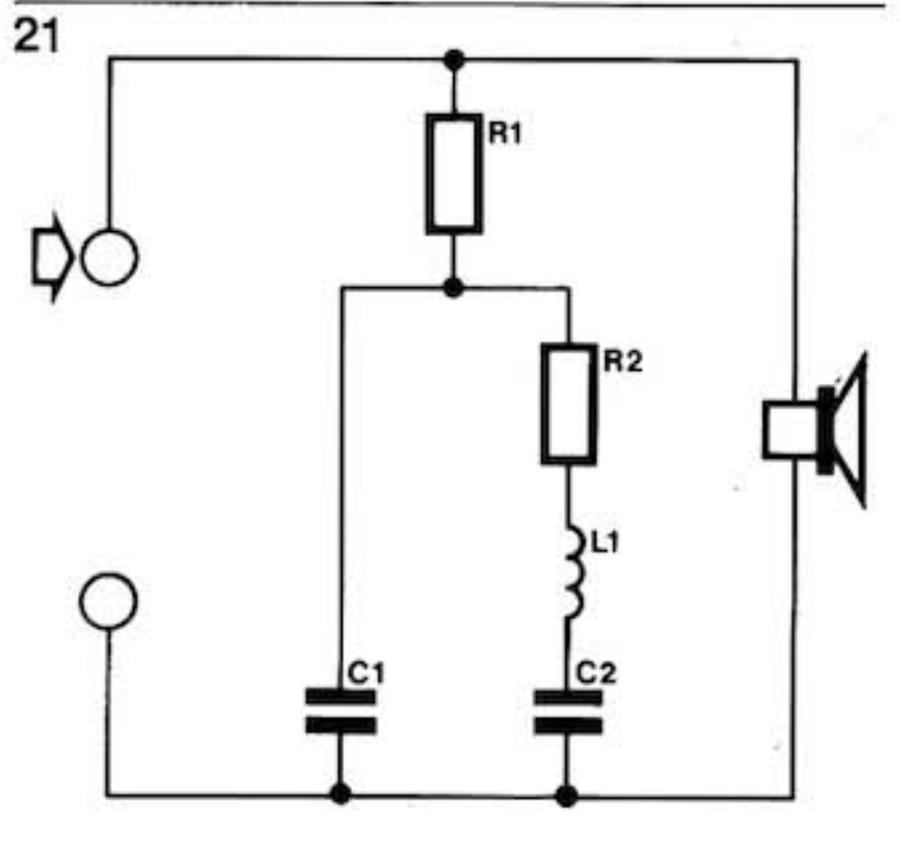
$$C2 = \frac{1}{Q_e \cdot R_{dc} \cdot 2\pi \cdot f_c}$$

$$L1 = \frac{Q_e \cdot R_{dc}}{2\pi \cdot f_c}$$

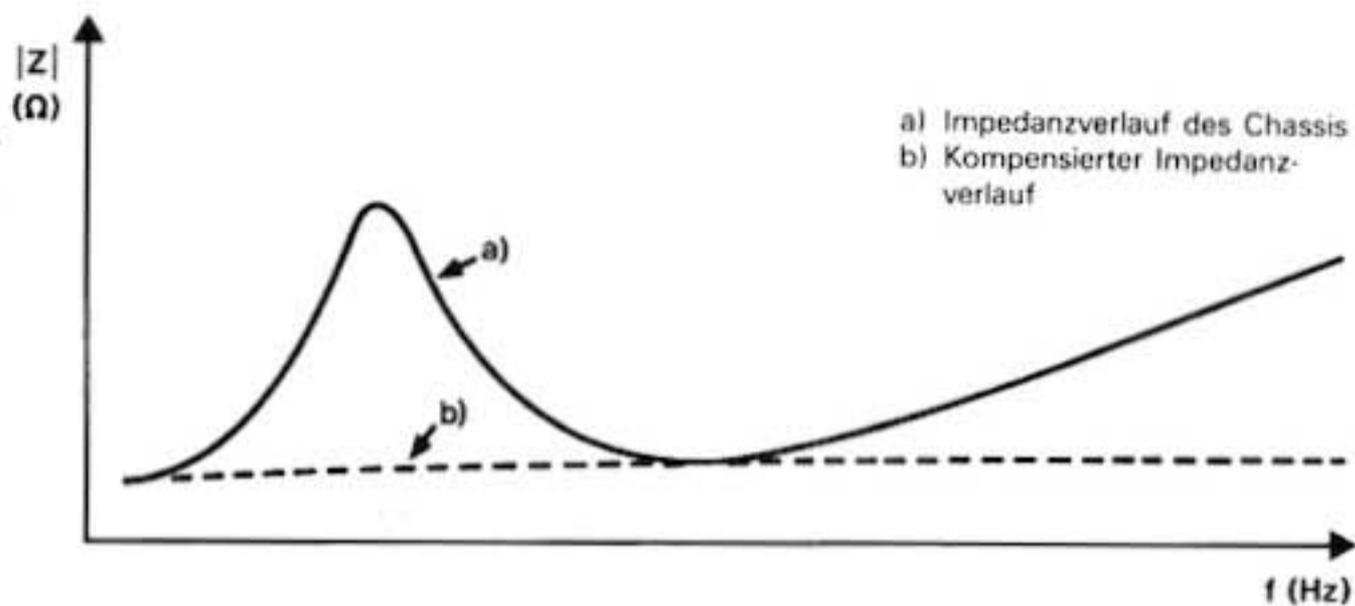
Wer diesen Aufwand nicht treiben will, sollte aber auch bei Frequenzweichen höherer Ordnung die Chassisimpedanz im Auge behalten und zumindest die Spuleninduktivität kompensieren. Sonst wird aus einer gut berechneten 12 dB Weiche eine schlecht berechnete 18 dB Weiche (Bild 3.22), da sich die Induktivi-

Bild 3.21. Komplettes Impedanzequalizing des Lautsprecherchassis.

Die Korrektur muß genau auf das (eingebaute) Chassis abgestimmt sein. Dieses Equalizing ist daher nur zu empfehlen, wenn genaue Impedanzmessungen möglich sind.



21



a) Impedanzverlauf des Chassis
b) Kompensierter Impedanzverlauf

22

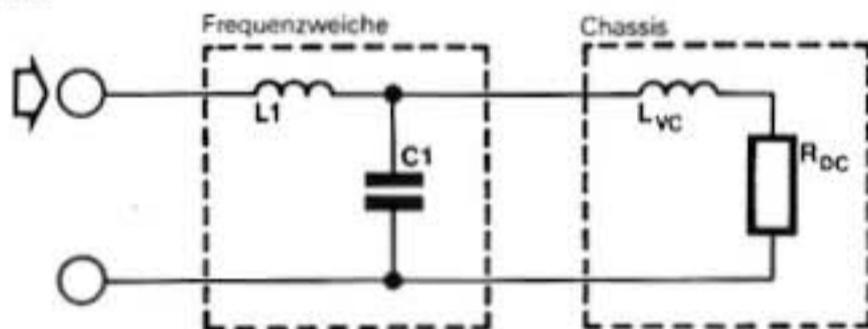


Bild 3.22. Durch die Induktivität der Schwingspule wird aus einer 12 dB Weiche gerne eine 18 dB Version.

tät der Schwingspule heimlich an die Weiche hängt.

Bei Weichen 3ter und 4ter Ordnung ist es nicht anders.

Eine Kompensation der Chassis-Impedanz bei der Resonanzfrequenz ist nicht immer nötig, da zumindest bei Filtern 2ter und 4ter Ordnung eine Spule parallel zum Chassis liegt. Deren Widerstand verringert sich zur Resonanzfrequenz des Chassis, so daß die elektrische Bremse einigermaßen in Funktion bleibt. Wer auf der Suche nach Linear-Phase ist, muß aber alles exakt kompensieren. Selbst dann ist die Phasenlage des abgestrahlten Signals nicht immer mit dem Eingangssignal identisch, besonders in der Nähe der Resonanzfrequenz. In diesem Fall sollten die Mittel- und Hochtonchassis immer erst weit über der Eigenresonanz eingesetzt werden.

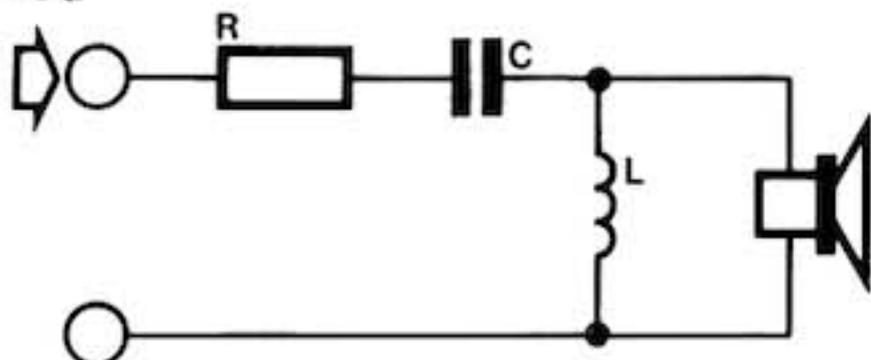
Wenn Sie jetzt als Käufer einer Fertigbox oder eines kompletten Selbstbau-Kits davon ausgehen, daß Sie so die Probleme der Frequenzweichenentwicklung umgehen können, trifft das leider oft nicht zu. Sie werden oft feststellen, daß die in mühsamer Kleinarbeit optimier-

ten Frequenzweichen von Fertigboxen und Selbstbau-Kombinationen offensichtlich nicht für Ihren Hörraum oder Ihre Aufstellposition ausgelegt sind. Das stimmt unzufrieden. Der Versuch, hier mit den Klangreglern des Verstärkers etwas zu korrigieren, geht meist daneben, da deren Einstellbereich natürlich wieder neben dem Fehler liegt (z.B. bei zu leisen Mitteltonchassis). Wenn Sie mit Erfolg etwas verbessern wollen, müssen Sie die Frequenzweiche umbauen. Es sind dann allerdings die folgenden Kleinigkeiten zu beachten.

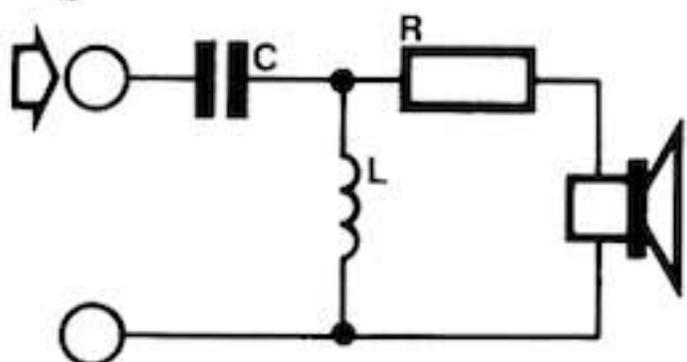
Die Pegeländerung erfolgt über Widerstände in der Zuleitung zu den einzelnen Chassis. Das allerdings hat eine ärgerliche Konsequenz zur Folge: Sie können die Lautstärke eines Chassis nur dann erhöhen, wenn bereits Widerstände in der Frequenzweiche vorhanden sind, deren Werte Sie verringern. (Es gibt auch eine andere Möglichkeit, den Schallpegel eines Chassis über dessen normalen Wert hinaus zu erhöhen: durch zugeschaltete Schwingkreise. Aber das ist nur für einen sehr engen Frequenzbereich möglich und deshalb weniger interessant.) Die Widerstände können an verschiedenen Positionen in der Frequenzweiche angebracht sein bzw. werden, wenn ein Chassis leiser zu machen ist. (Bild 3.23a bis 3.23d).

Nur bei den Anordnungen a und d in Bild 3.23 können Sie die Werte direkt verändern, ohne die Bauteile der Frequenzweiche mit ändern zu müssen! Bei den Anordnungen b und c ist der Widerstand mit der Impedanz des Chassis in der Berechnung der Frequenzweichenbauteile enthalten. Wenn Sie zum Beispiel in der Anordnung b den Widerstand R verkleinern, so verringert sich der Abschlußwiderstand der

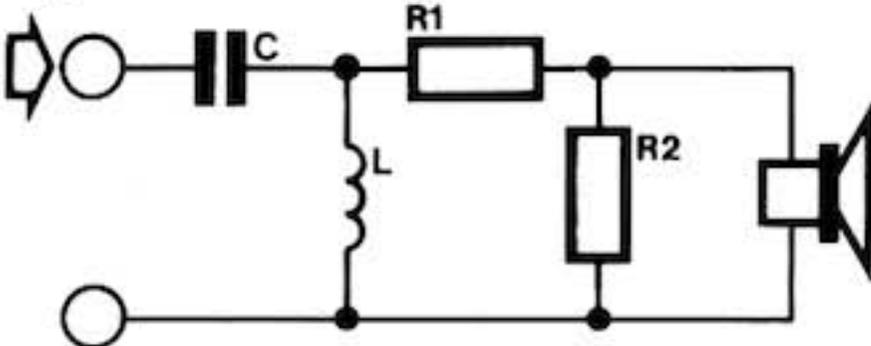
23a



b



c



d

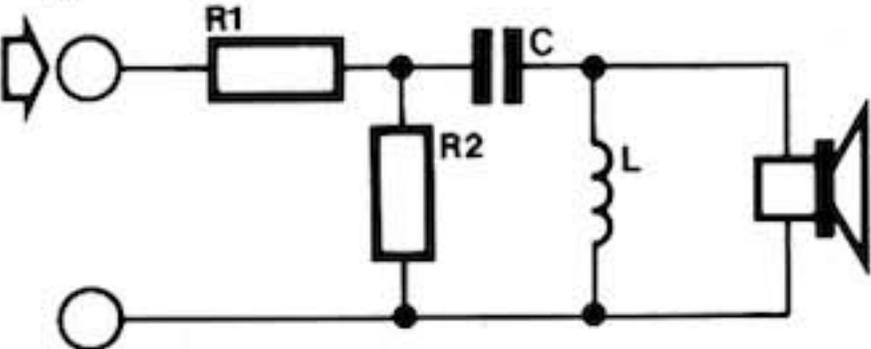


Bild 3.23. Mögliche Anordnungen von Widerständen in Frequenzweichen.

Frequenzweiche. Sie müssen in diesem Fall den Kondensator C vergrößern und die Spule L verkleinern, wenn die ursprüngliche Übernahmefrequenz erhalten bleiben soll. Dabei werden dem Kondensator und der Spule einfach weitere Bauteile parallel geschaltet. (Der Focal Importeur hat einmal unfreiwillig demonstriert, was passiert, wenn das Gegenteil gemacht wird. Bei dem Versuch, die Kombination 300 DB auf etwas lautere Hochtonwiedergabe abzustimmen, verursachte dieser Denkfehler eine Pegelabsenkung von ca. 8 dB in der Nähe der Übernahmefrequenz. Die Testergeb-

nisse waren entsprechend schlecht. Für alle 300 DB Besitzer hier die richtigen Werte. Die französische Originalversion (mit zu leisem Hochtonbereich) hat folgende Bestückung:

$R = 3,9 \text{ Ohm}$ (Original)

$C = 4,7 \text{ Mikروفарад}$

$L = 0,3 \text{ Millihenry}$

Für den angepaßten Hochtonbereich gilt folgende Bestückung:

$R = 2,2 \text{ Ohm}$ (neuer Wert)

$C = 5,5 \text{ Mikروفарад}$ (nicht 3,3 wie oft veröffentlicht)

$L = 0,26 \text{ Millihenry}$

Generell gilt für alle Modifikationen von Frequenzweichen, wenn nur ein Widerstand im Reihe zum Chassis liegt und dieser verändert wird:

$$C_{\text{neu}} = \frac{C_{\text{alt}}}{\frac{R_{\text{neu}} + Z}{R_{\text{alt}} + Z}}$$

C_{neu} = neuer Kondensatorwert

C_{alt} = alter Kondensatorwert

R_{neu} = neuer Vorwiderstand

R_{alt} = alter Vorwiderstand

Z = Chassis-Impedanz

$$L_{\text{neu}} = L_{\text{alt}} \frac{R_{\text{neu}} + Z}{R_{\text{alt}} + Z}$$

L_{neu} = neuer Spulenwert

L_{alt} = alter Spulenwert

Dabei ist Z die Nennimpedanz des Chassis. Ist aus einer Impedanzkurve die tatsächliche Impedanz des Chassis bei der Übernahmefrequenz bekannt, sollte dieser genauere Wert bei der Berechnung auch verwendet werden. Die neuen Werte für L und C erreichen Sie einfach durch Parallelschalten von weiteren Spulen und Kondensatoren (Bild 3.24). Das höht den Kapazitäts- und erniedrigt den Induktivitätswert. Sie brauchen dazu keine Bauteile aus der Frequenzweiche auszubauen, sondern die neuen werden einfach an die Anschlüsse der vorhandenen Spulen und Kondensatoren mit angelötet.

Der neue Gesamtwert errechnet sich nach den folgenden Formeln:

$$C_{\text{neu}} = C_{\text{alt}} + C1 + C2 + \dots$$

$$L_{\text{neu}} = \frac{1}{\frac{1}{L1} + \frac{1}{L2} + \frac{1}{L3} + \frac{1}{L4} + \dots}$$

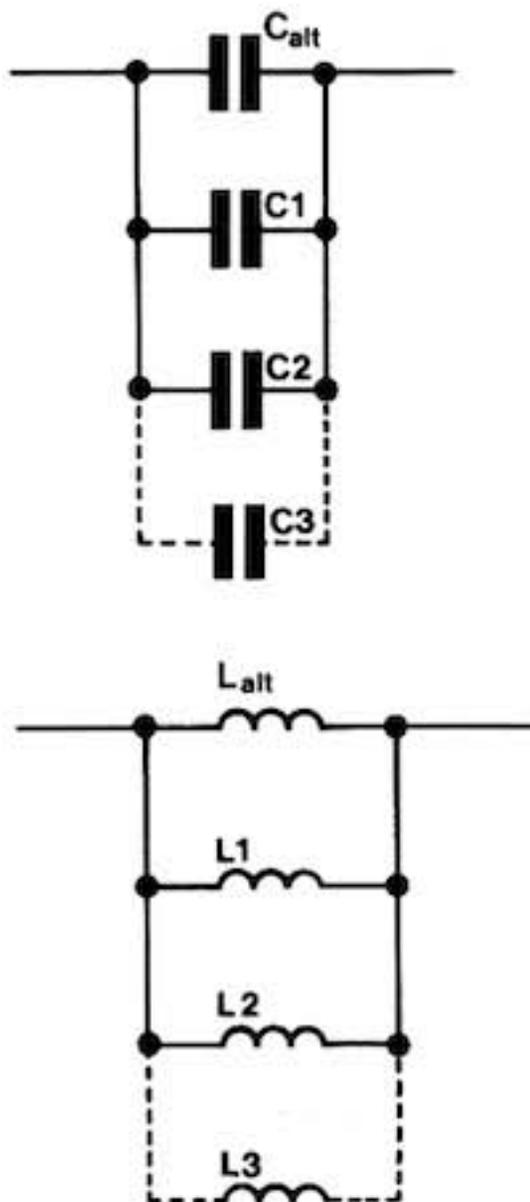


Bild 3.24. Mit parallelgeschalteten Kondensatoren und Spulen vergrößert man die Kapazität des ursprünglichen Kondensators und verringert die Induktivität der ursprünglichen Spule.

Muß die Kapazität verringert und die Induktivität erhöht werden, sind die neuen Bauteile zu den bereits vorhandenen in Reihe zu schalten. Jetzt kehren sich die Berechnungen für Kondensator und Spule um:

$$C_{\text{neu}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots}$$

$$L_{\text{neu}} = L_{\text{alt}} + L_1 + L_2 + \dots$$

Die Pegelabsenkung in dB des Chassis durch einen Vorwiderstand R berechnet sich näherungsweise nach der Formel:

$$\text{Absenkung} = 20 \log \frac{Z}{R + Z}$$

Für Chassis, die über sogenannte L-Glieder

(Bild 3.25) angepaßt sind, muß man zuerst den Abschlußwiderstand der Frequenzweiche berechnen. Mit diesen L-Gliedern kann zwar eine Pegelabsenkung vorgenommen werden, ohne die Nennimpedanz des Chassis zu verändern, aber das muß nicht immer der Fall sein. Sie können z.B. auch andere Abschlußwiderstände erzeugen, die sich besser mit den Kondensatorwerten vertragen, die gerade in der Materialkiste vorrätig sind.

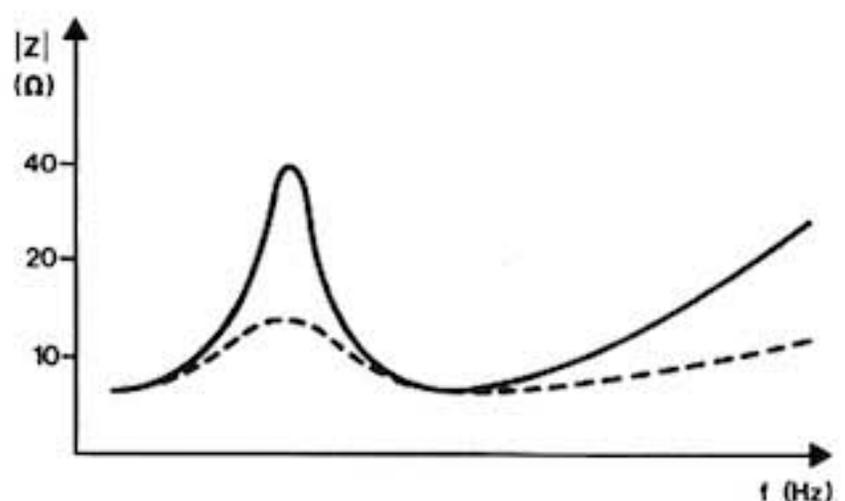
Die Schaltung aus Bild 3.25 glättet den Impedanzverlauf des Chassis durch den Parallelwiderstand R2. Sie wird recht gerne eingesetzt, um Rückwirkungen vom Chassis auf die Frequenzweiche zu verringern. Der Abschlußwiderstand von Chassis und Widerständen wird wie eine normale Parallelschaltung behandelt:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}$$

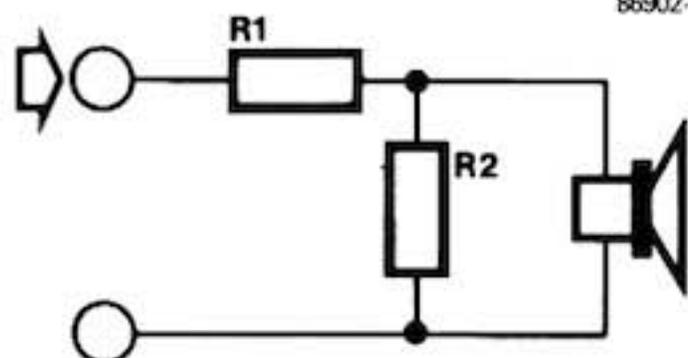
Wenn Sie den Schallpegel des Chassis erhöhen wollen, ohne die Bauteile der Frequenzweiche zu ändern, so muß R1 verkleinert und R2 vergrößert werden.

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{ges}}} - R_1 - \frac{1}{Z}}$$

Bild 3.25. Der Parallelwiderstand R2 glättet den Impedanzverlauf des Chassis.



86902-3-25



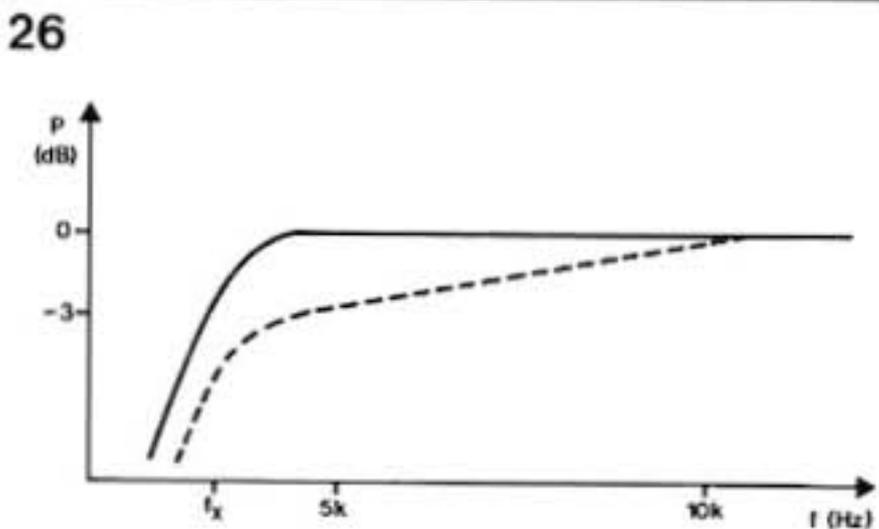
Leider wird dabei der Wert von R2 oft sehr hoch, so daß der glättende Einfluß auf die Impedanzkurve entfällt. Das stört die Übertragungsfunktion der Weiche. Es ist aus diesem Grund oft sinnvoll, lieber nur R1 zu ändern und die Bauteile der Weiche für den geringeren Abschlußwiderstand neu zu berechnen. Bei den Berechnungen ist dabei nur die Chassis-Impedanz Z durch Z' zu ersetzen:

$$Z' = \frac{Z \cdot R2}{Z + R2}$$

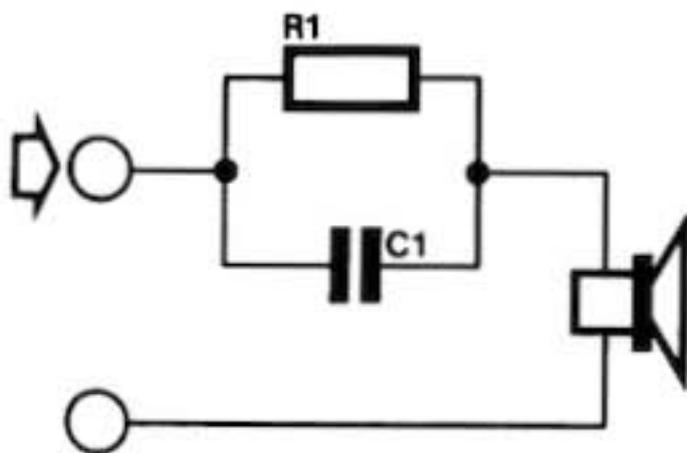
Sind Widerstände innerhalb der Frequenzweiche angeordnet, dann dürfen nur die Spulen und Kondensatoren verändert werden, die vor den Widerständen liegen.

Die letzte Variante zu diesem Thema ist in Bild 3.26 dargestellt. Es ist eine Widerstands/Kondensator-Kombination, die eine frequenzabhängige Absenkung realisiert. Die maximale Steigung der Kurven beträgt dabei 3 dB/Oktave. Es sind natürlich auch Kombinationen mit Spulen möglich.

Bild 3.26. Die Kombination von R und C (oder L) kann eine leichte Korrektur der Wiedergabekurve eines Chassis bewirken, z.B. eine relative Anhebung der Frequenzen um 15 kHz.



86902-3-26



Soweit zu den Frequenzweichen in der Praxis.

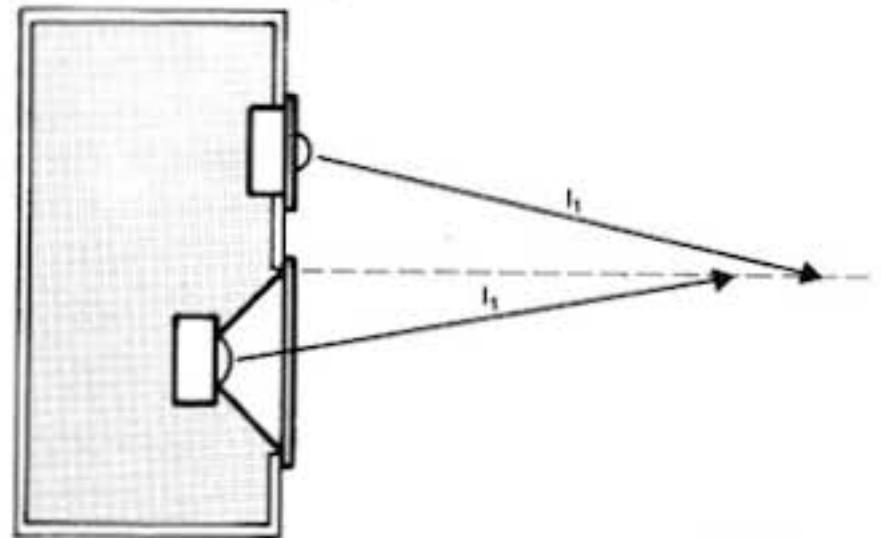
Einfluß der Gehäuse auf die Übertragungsfunktion

Nicht nur die Frequenzweichen, auch Lautsprechergehäuse haben einen großen Einfluß auf die Addition von Übertragungsfunktionen. Das Gehäuse bestimmt einerseits die Position der Chassis zueinander und beeinflusst damit die Addition der abgestrahlten Signale in verschiedene Richtungen. Andererseits ist die Front des Gehäuses für das Chassis eine Schallwand, deren Größe den Schalldruckverlauf beeinflusst.

Der erste Punkt ist leicht zu erklären. Werden Schallwellen von zwei räumlich getrennten Schallquellen abgestrahlt, dann addieren sie sich nur dann richtig, wenn die Laufzeit (Wegstrecke) zum Hörplatz für beide identisch ist. Bei der skizzierten Box in Bild 3.27a wird durch den vorversetzten Hochtöner ein negatives Delay in die Rechnung gebracht, daß das

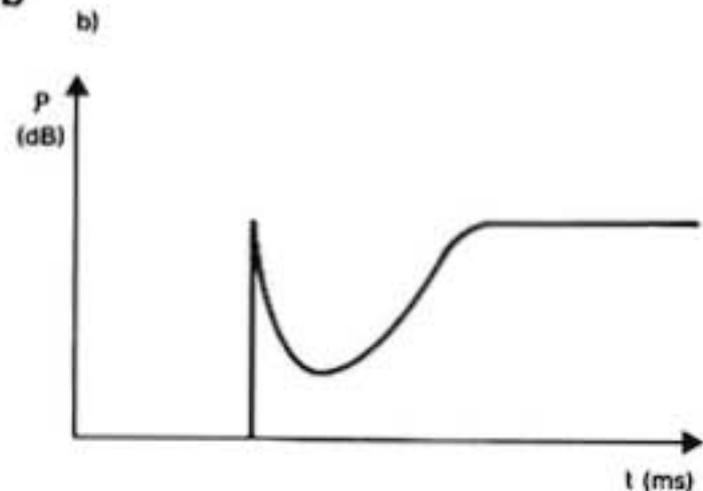
Bild 3.27. Die Anordnung der Chassis spielt bei der Impulswiedergabe eine wichtige Rolle.

27a



86902-3-27a

b)



Übertragungsverhalten der Kombination Frequenzweiche-Chassis stört. Dadurch ändert sich das Impulsverhalten beispielsweise, wie es Bild 3.27b zeigt.

Zusätzlich wird auch die Schalldruckwiedergabe verändert, da die abgestrahlten Signale sich gegenseitig abschwächen. Mehr noch, sie können sich bei 180 Grad Phasenfehler ($1/2$ Wellenlänge) völlig auslöschen.

Es gibt Wege, um eine versetzte Anordnung der Chassis in eine Frequenzweiche einzurechnen. Das ist jedoch sehr aufwendig und damit meist den engagierten professionellen Herstellern vorbehalten. Außerdem kann so nur die Abstrahlung in eine Richtung (meist nach vorne) optimiert werden; in alle anderen Richtungen treten Abweichungen durch Interferenzeffekte auf.

Um hier Probleme zu vermeiden, sollen die akustischen Zentren aller Chassis übereinander in einer Ebene liegen. (Es gibt Untersuchungen mit dem Ergebnis, daß die Klangverbesserungen mancher Linear-Phase-Konzepte allein auf diese Anordnung der Chassis, nicht aber auf die Frequenzweiche zurückzuführen sind.) Nur, wo ist das jeweilige akustische Zentrum eines Lautsprecherchassis? Es ist mit Sicherheit nicht die Schwingspule, auch wenn viele Hersteller der Einfachheit halber immer empfehlen, alle Schwingspulen übereinander anzuordnen.

Jedes Lautsprecherchassis bewegt eine mitschwingende Luftmasse (Bild 3.28), die zu hohen Frequenzen immer geringer wird. Damit ist das akustische Zentrum frequenzabhängig. Für das akustische Zentrum exakt auszumachen, sind Impulsmessungen erforderlich. Dabei ist die Auswertung je nach zur Verfügung stehenden Meßgeräten (Transientenrekordern, Speicher-Oszilloskope) mehr oder weniger aufwendig. Für den Hausgebrauch kann man davon ausgehen, daß die akustischen Zentren bei höheren Frequenzen in der Nähe der Membran zu finden sind. Wer ganz sicher gehen will (oder Experimente mit 12 dB Frequenzweichen und Delay anstellen möchte), der sollte alle Chassis in einzelne Gehäuse einbauen. Sie können dann auch einfach das Meßgerät Gehör einsetzen und bei der Wiedergabe von Sprache recht schnell die optimale Position orten.

Nun einige Worte zur Schallwand. Sehr viele Hobby-Konstrukteure kaufen Lautsprecherchassis nach den Schalldruckkurven, die die

28

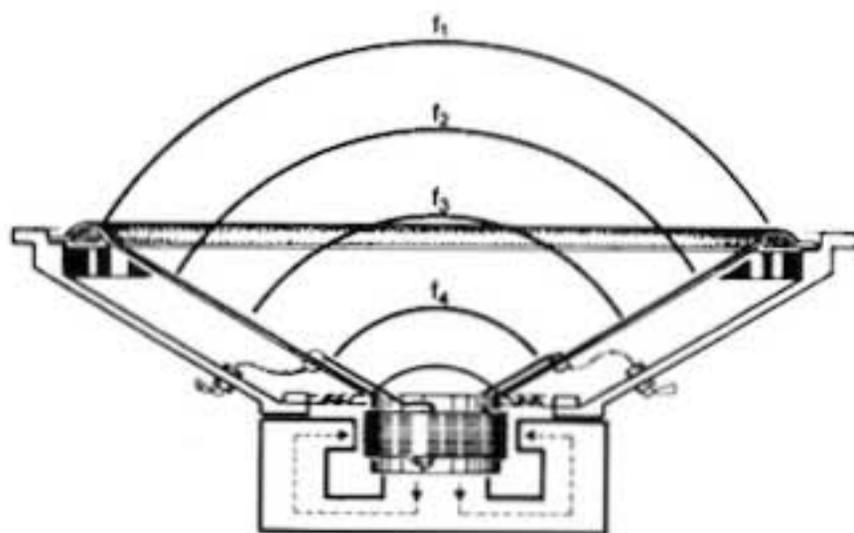


Bild 3.28. Das akustische Zentrum eines Lautsprecherchassis ist frequenzabhängig und sicher nicht in der Nähe der Schwingspule zu finden. Je tiefer die abgestrahlte Frequenz ist, um so weiter wird das akustische Zentrum durch die mitschwingende Luftmasse nach vorne verschoben.

Hersteller (oft etwas geglättet) veröffentlichen. Dabei werden Chassis mit möglichst linearem Kurvenverlauf bevorzugt. Die Sache hat allerdings einen Haken, denn fast alle Hersteller messen diese Kurven auf einer großen Normschallwand, wodurch das Chassis maximal nur über eine Halbkugel abstrahlen kann (Bild 3.29).

Beim Einbau in ein Lautsprechergehäuse kann es aber vorkommen, daß bestimmte Frequenzen kugelförmig abgestrahlt werden (Bild 3.30).

Da die Oberfläche der Kugel in gleichem Abstand doppelt so groß wie die der Halbkugel ist, gegenüber der großen Schallwand, fehlt jetzt bei Messungen auf Achse die halbe Schallenergie. Das senkt den gemessenen Schallpegel um 3 dB ab (Bild 3.31a).

Die fehlende Schallenergie ist natürlich nicht verschwunden, sie wurde nur in andere Richtungen abgestrahlt, so daß das Gehör sie jetzt als indirekten Schallanteil anders bewertet. Wie Sie aus den Zeichnungen sehen, ist der Effekt von der Position des Chassis und der Größe der Schallwand abhängig. Wird das Tieftonchassis nahe am Boden angebracht, ändert das am Schalldruckverlauf kaum etwas (dafür werden die vertikalen Raumresonanzen

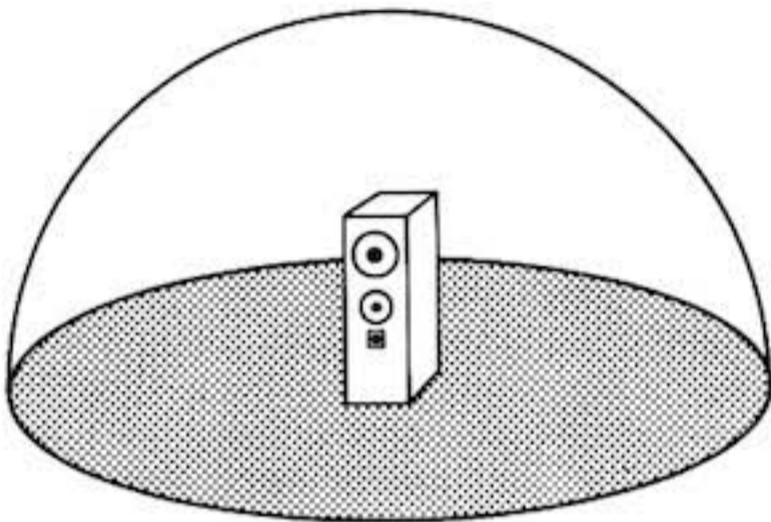
Bild 3.29.

Bild 3.30.

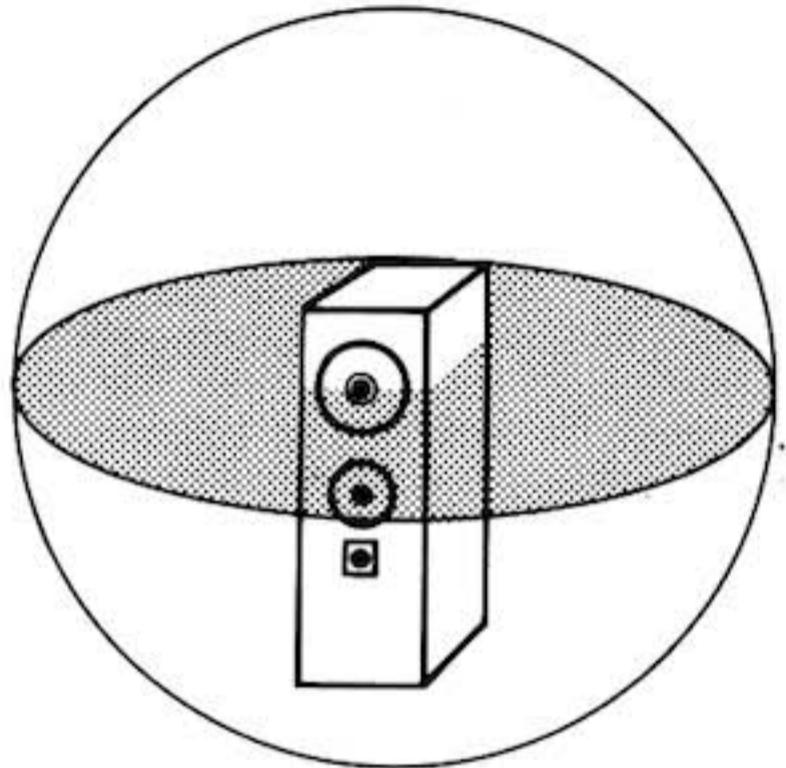
Bild 3.31a. Das ist der Schalldruck bei Messungen mit einer geschlossenen Schallwand und $Q_{tc} = 0,707$. Das Baßchassis befindet sich weit über dem Boden und die Box steht frei im Raum.

kräftig angeregt). Bringt man das Chassis dagegen oben im Gehäuse an, so werden Frequenzen, deren Wellenlänge kleiner als der doppelte Abstand Chassis/Boden ist, um 3 dB abgesenkt. Voraussetzung: Es sind keine anderen Wände in unmittelbarer Nähe des Tieftonchassis. Für den Konstrukteur einer Lautsprecherbox ist das erfreulich, denn er kann jetzt eine tiefere untere Grenzfrequenz für

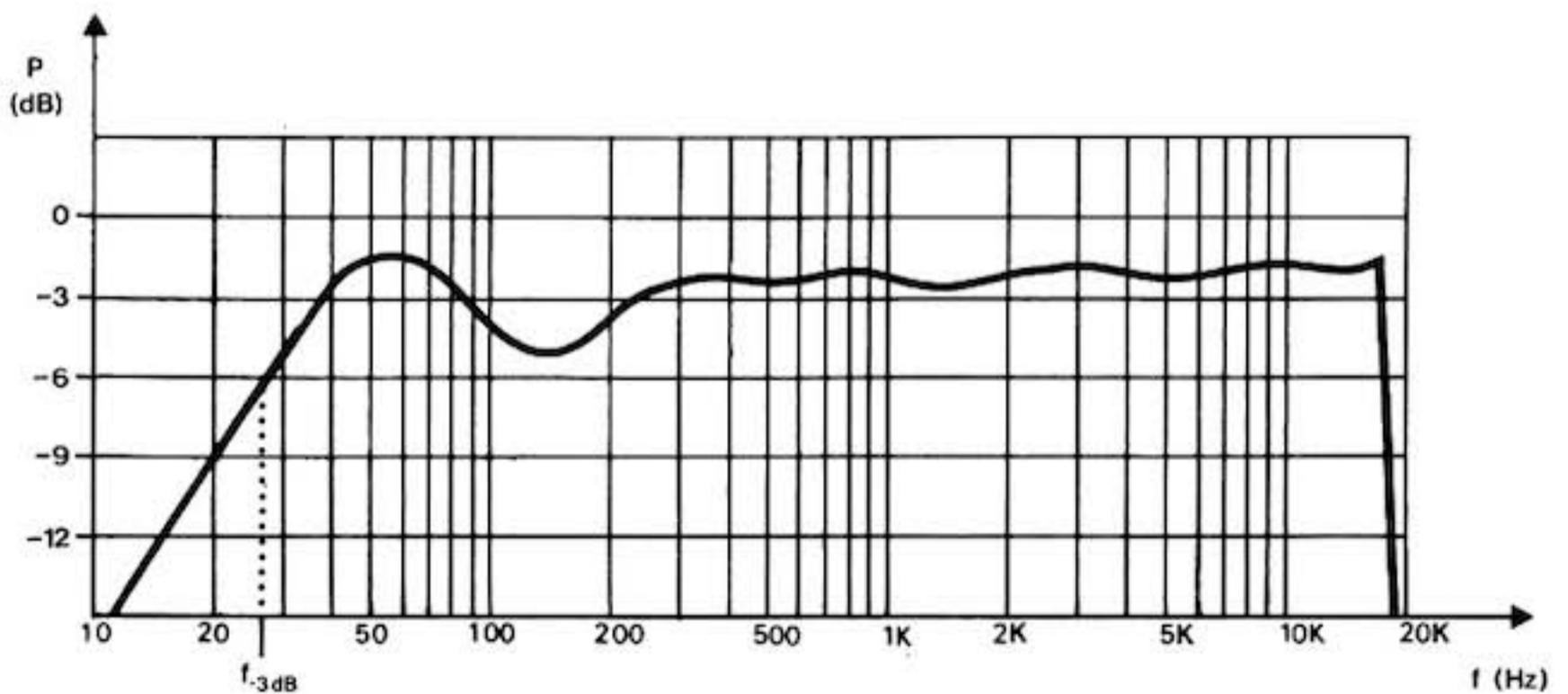
29



30

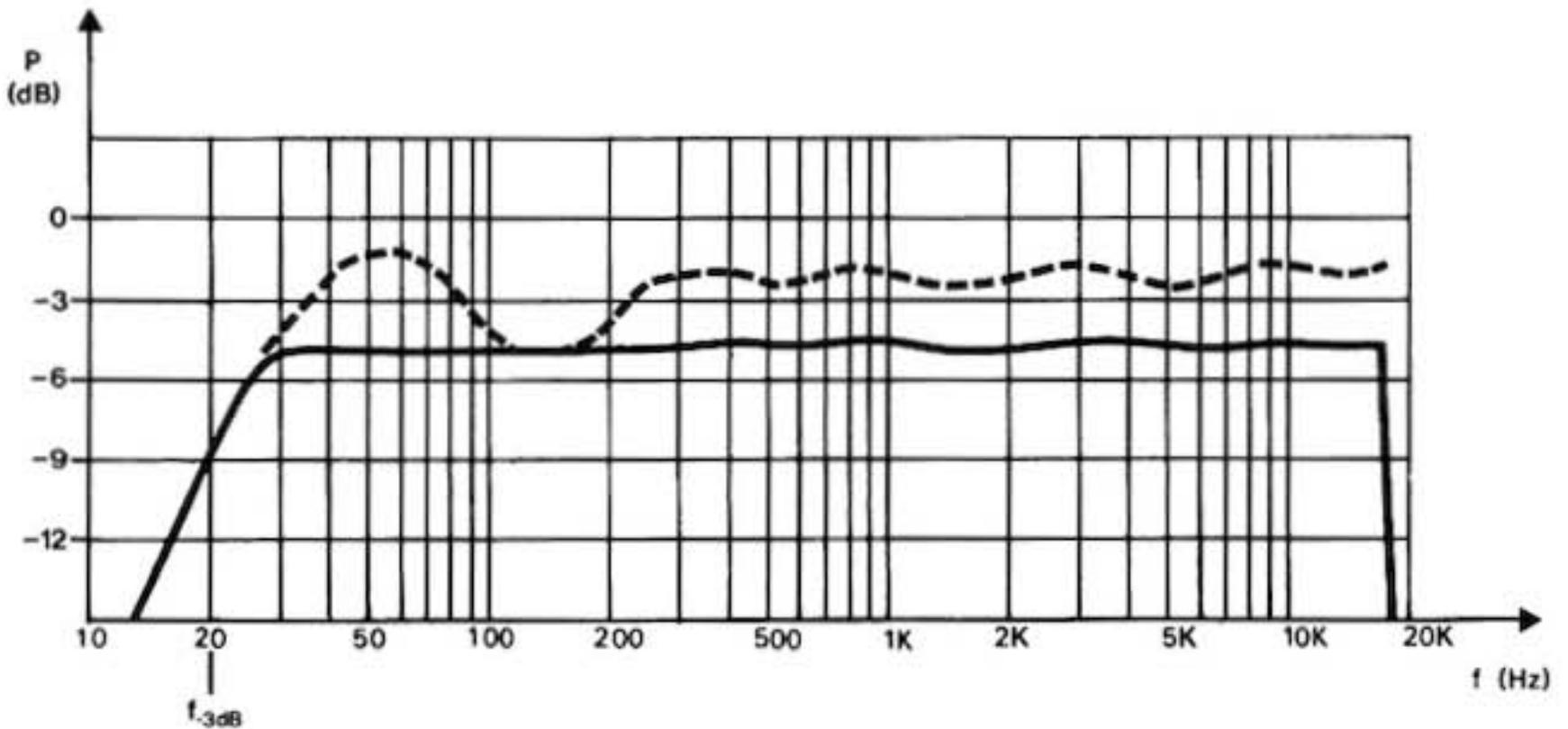


31a



86902-3-31a

31b



32

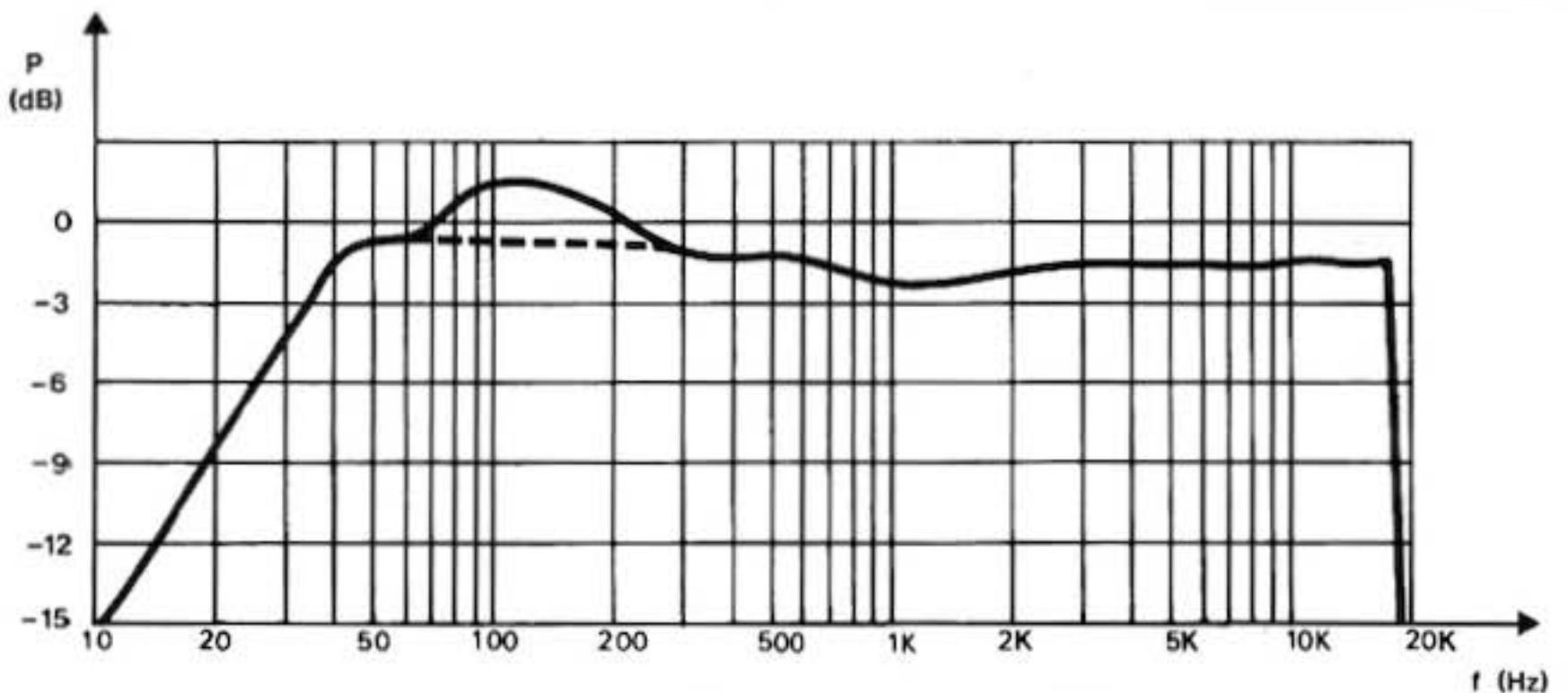


Bild 3.31b. Die Kurve zeigt das Meßergebnis bei einer Abstimmung auf $Q_{tc} = 0,5$ mit Pegelkorrektur im Mitteltonbereich.

Bild 3.32. Durch Aufstellung der Box in der Nähe von Raumwänden wird der Frequenzbereich um 100 Hz überbetont.

seine Box angeben. Er reduziert die Baßwiedergabe, um die Kurve zu linearisieren. Damit liegt die neue Grenzfrequenz niedriger (der Wirkungsgrad in dB/W/m natürlich auch). Diese Situation ist durch die Kurve in Bild 3.31b dargestellt.

Bei höheren Frequenzen wird die Schallwand des Gehäuses oder die Membran des Chassis dann ähnlich groß wie die abgestrahlten

Schallwellen. Die Schallabstrahlung wird nach vorne gebündelt. Hier hilft aber ein Mitteltonchassis mit kleinerer Membran, die den Abstrahlwinkel auch höherer Frequenzen zumindest bei 180 Grad halten kann. Wird für das Mitteltonchassis ein kleineres Gehäuse mit entsprechend kleinerer Schallwand eingesetzt, dann ist natürlich auch im Mitteltonbereich ein größerer Abstrahlwinkel möglich. Für den Schalldruckverlauf gilt dann aber das gleiche wie für das Tieftonchassis.

Aber: Stellt man eine solche Lautsprecherbox in der Nähe von Raumwänden auf, dann wird die sonst nach hinten abgestrahlte Schallenergie ebenfalls nach vorne reflektiert. Der Schalldruckverlauf entspricht jetzt dem der Kurve in Bild 3.32.

Ohne Equalizing ist das Ganze nicht mehr so recht Hifi-tauglich. Auch das ist wieder ein guter Grund dafür, fertige Lautsprecherboxen vor dem Kauf im eigenen Wohnraum zu testen. Beim Selbstbau muß bereits vor der Planung einer Lautsprecherbox festliegen, ob sie später frei im Raum stehen oder als Regalboxen unmittelbar in der Nähe von Raumwänden aufgestellt werden soll. Sie erinnern sich sicherlich an die Tabelle für die günstigsten Aufstellpositionen im Kapitel über Raumakustik. Diese Tabelle, die den Einfluß der Raumwände auf die Wiedergabekurven verschiedener Lautsprecherboxen berücksichtigt, bietet einen Lösungsweg. Wenn Sie vorhandene Lautsprecherboxen, wie normal üblich, in der Nähe von Raumwänden aufstellen, so finden Sie in der Tabelle für viele Positionen direkt die Werte für Q_t und f_s . Eine Lautsprecherbox liefert mit diesen Werten sehr gute Ergebnisse, denn sie beschreiben genau die benötigte Baßentzerrung. Dabei ist es ganz interessant festzuhalten, daß Sie für nicht-symmetrische Aufstellung der Boxen im Grunde zwei verschiedene Abstimmungen und damit verschiedene Gehäuse für verschiedene Werte f_c und Q_{tc} einsetzen können. Wer die Boxen also noch kaufen oder bauen will, hat die Freiheit, zuerst den Aufstellungsort zu wählen und dann die Gehäuse entsprechend anzupassen. Wenn Sie Ihre Lautsprecherboxen freistehend in einem großen Raum unterbringen wollen (können), dann bestimmt die Position des Tieftonchassis die richtige Abstimmung der Box. Befindet sich das Chassis in Bodennähe, sind die üblichen Berechnungen für Q_t und f_s (auf die wir gleich kommen) richtig. Ist aber das Chassis in einem großen Gehäuse oben untergebracht, müssen Sie die Werte für Q_t um ein Viertel verringern, sonst wird der Baß zu laut. Eine Ausnahme ist es, wenn die Schallwand des Gehäuses sehr groß ist und bereits bei tieferen Frequenzen für halbkugelförmige Abstrahlung sorgt. Bei manchen Studio-Monitoren, bei denen neben Mittel- und Hochtonchassis auch noch zwei 38 cm Bässe auf der Schallwand Platz haben müssen, ist das der Fall. Hier spielt die Höhe der Tieftonchassis über dem Boden keine große Rolle mehr.

Als dritter Weg bieten sich noch die Regalboxen an. Die Abstrahlung erfolgt hier wie bei der Schallwandmontage immer maximal über eine Halbkugel. Nur Frequenzen, deren Wel-

lenlängen kleiner als die doppelte Tiefe des Gehäuses sind, können etwas Ärger verursachen, wenn sie nicht schon durch die Größe der Schallwand oder der Membran gerichtet abgestrahlt werden. Regalboxen sollten daher eher etwas breiter als tief sein. Natürlich sind auch Formen wie in Bild 3.33 sinnvoll.

33

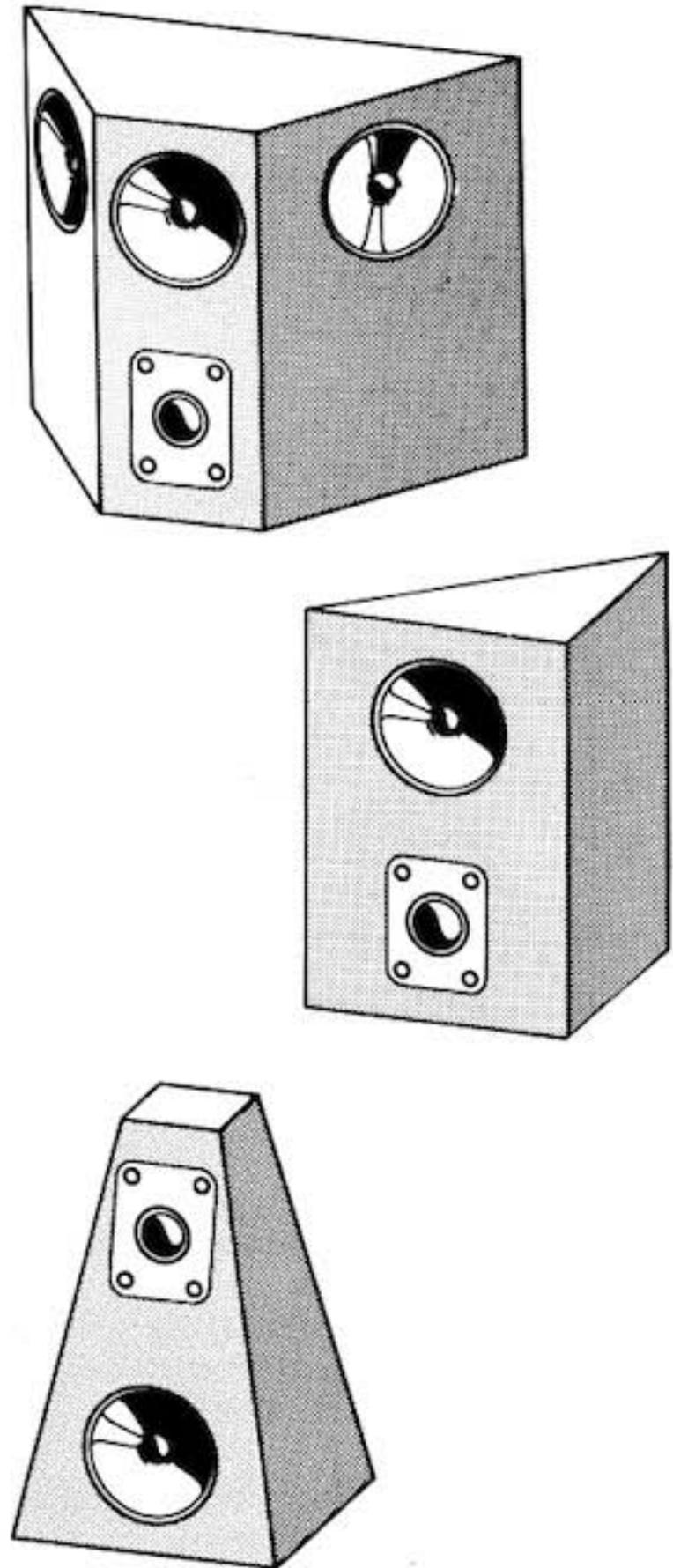


Bild 3.33. Regalboxen können zur Verbesserung der Abstrahlcharakteristik mit mehreren kleinen Chassis bestückt werden. Sie müssen nicht immer aussehen wie Schuhkartons.

Je nach Höhe über dem Boden kommt es auch hier zu einer Anhebung tieferer Frequenzen. Die Werte für Q_1 sind also etwas zu korrigieren. Ein völlig linearer Verlauf von Schalldruck und abgestrahlter Schallenergie ist hier ohne Equalizing leider nicht zu erreichen. Das geht aber über einen anderen Weg. Bringt man das Tieftonchassis dicht an Rückwand sowie Boden und weit von der Seitenwand des Raumes an, ist eine lineare Abstrahlung tiefer bis mittlerer Frequenzen möglich. Der Wirkungsgrad der eingesetzten Chassis erhöht sich um 3 dB, da die Abstrahlung jetzt über einem Viertel der Kugeloberfläche erfolgt. Werden die Mitteltonchassis jetzt in Ohrhöhe angebracht (Bild 3.34), dann ist der Einfluß des Bodens auf diese Chassis bis zu einer Frequenz, deren Wellenlänge der dreifache Betrag von E ist, vernachlässigbar gering. Bei $E = 100$ cm kann damit die unterste Trennfrequenz von Tief- und Mitteltonchassis oberhalb von 150 Hz liegen. (E ist die Entfernung vom Boden zum Mittelpunkt des Mitteltonchassis.)

34

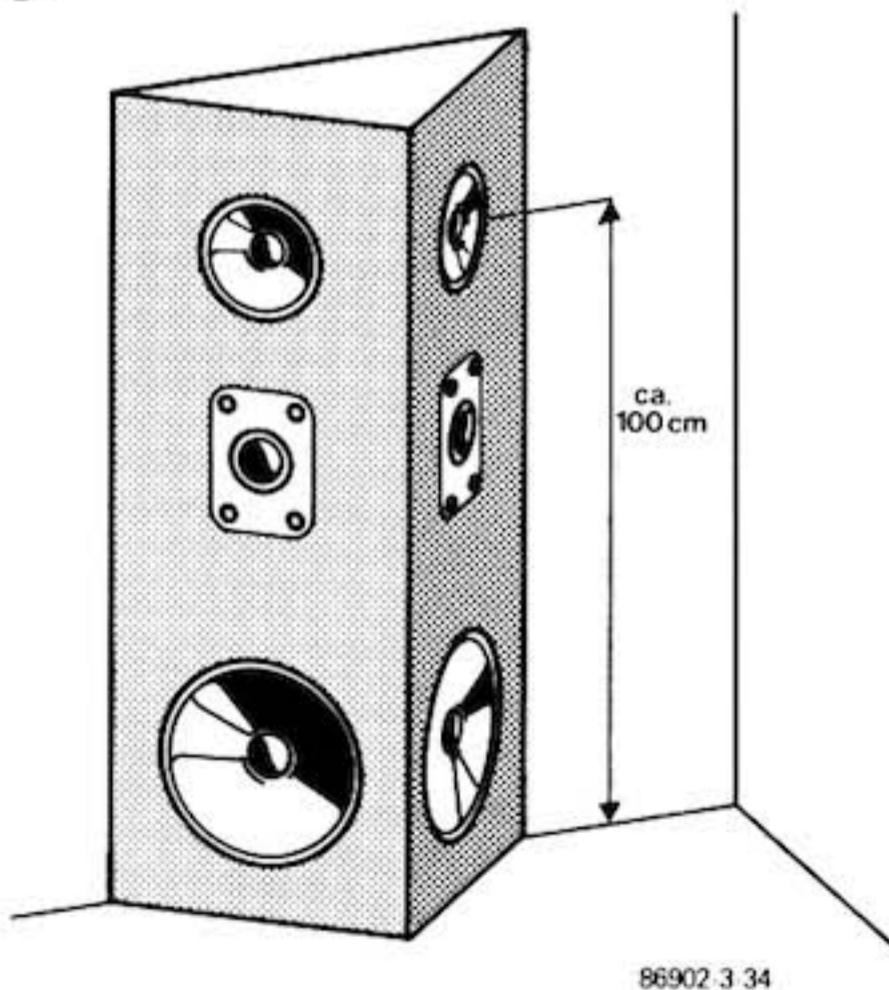


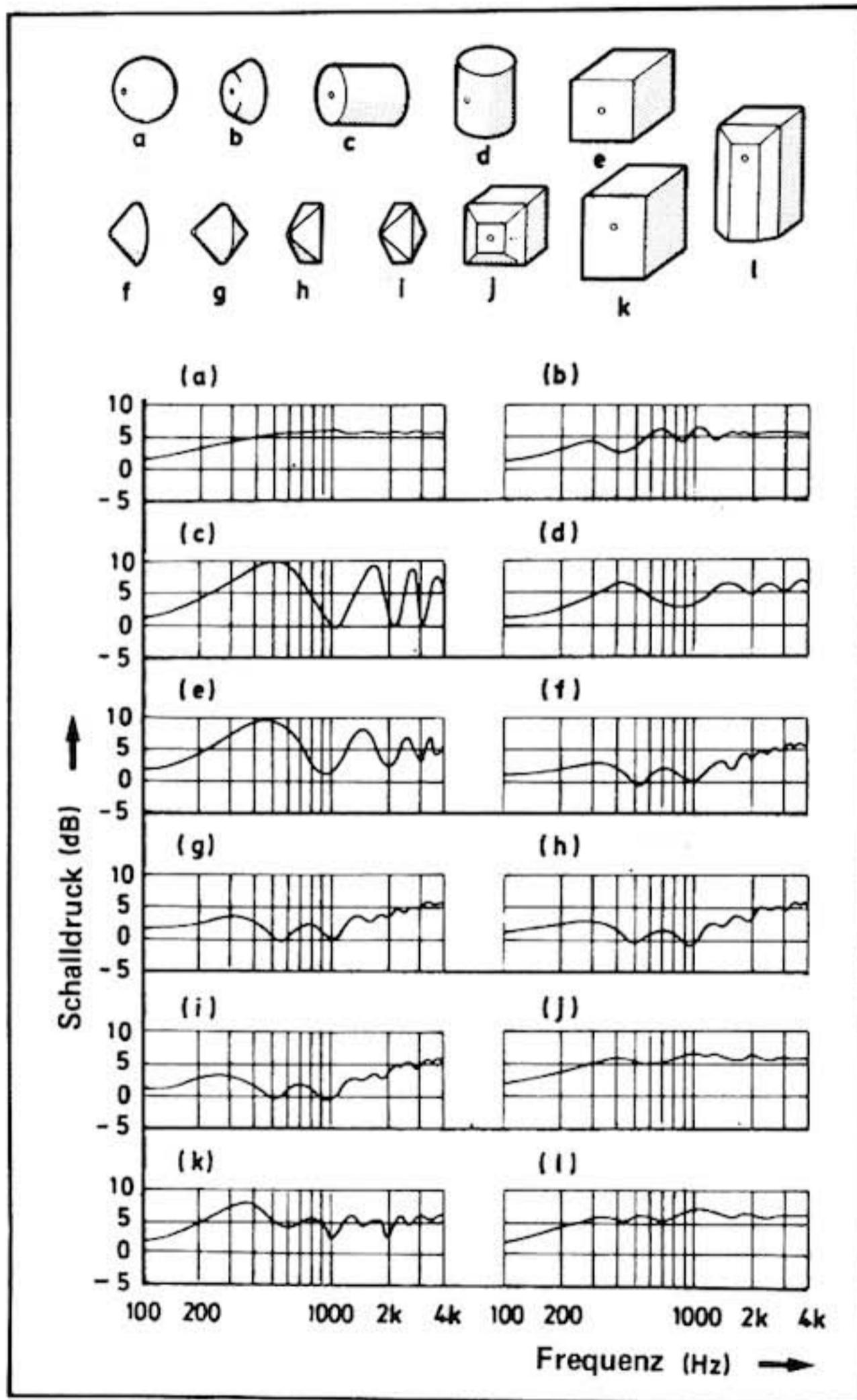
Bild 3.34. Konstruktion einer Standbox für optimale Anpassung an den Hörraum (nach Allison).

Die Chassisanordnung aus Bild 3.34 schlug R. Allison vor längerer Zeit vor. Sie kann natürlich auch als Subwoofer-Satelliten Kombination realisiert werden. Berücksichtigen Sie bei passiven Konzepten bitte immer den 3 dB höheren Wirkungsgrad der Tieftonchassis!

Noch einige Worte zur Form von Lautsprechergehäusen. Solange keine Bündelung der Schallabstrahlung durch die Membran stattfindet, kann es zu Beugungseffekten an den Kanten eines Lautsprechergehäuses kommen. Durch diese Beugungseffekte entstehen neue Schallquellen, die mit geringer zeitlicher Verzögerung abstrahlen und so die Stereoortung beeinträchtigen können. Weiterhin gibt es mit dem direkt abgestrahlten Schall Interferenzen, wodurch sich der Schalldruckverlauf verschlechtert. Diese Effekte können die Wiedergabeeigenschaften von Lautsprecherboxen sehr ungünstig beeinflussen.

Eine Untersuchung der Einflüsse der Gehäuseform auf die Schallabstrahlung wurde vor langer Zeit von H.F. Olson angestellt, die Ergebnisse sind in Bild 3.35 zusammengefaßt. Inwieweit Sie diese Einflüsse berücksichtigen sollten, hängt von den verwendeten Chassis ab. Bei Mehrwege-Boxen mit kleinen Mitteltonchassis, die auch bei 2...3 kHz keine Richtwirkung zeigen, ist immer mit einem störenden Einfluß von Gehäusekanten zu rechnen. Setzen Sie dagegen bei 2-Wege Boxen größere Tieftonchassis ein, wird bereits durch die Membrangröße eine seitliche Abstrahlung im Mitteltonbereich ausgeschlossen.

Die größten Probleme verursachen Kalottenmittelton- und Hochtonchassis. Eine 50 mm Kalotte wird bei 2...3 kHz noch in alle Richtungen gleich abstrahlen, so daß hier abgeschrägte oder verrundete Kanten einiges verbessern. Ebenso kann die Schallwand mit absorbierendem Material belegt werden, um die Schallenergie auf dem Weg zu den Gehäusekanten zu absorbieren. Dieses Verfahren vereinfacht den Gehäusebau, vernichtet aber Schallenergie, die sonst den indirekten Schallanteil verbessern würde. Wer gute schreinerische Fähigkeiten besitzt, der sollte Sie hier einsetzen, zumal ein derart optimiertes Gehäuse (oder mehrere einzelne für Tief-, Mittel- und Hochtonchassis) auch optisch ansprechender ist, als die konventionelle Kistenform, für die wirklich nur die geringen Herstellungskosten sprechen.



86902-3-35

Bild 3.35. Einfluß der Gehäuseform auf die Wiedergabekurven von Lautsprecherchassis (nach H.F. Olsen).

Im folgenden Kapitel kommen wir zum Einbau von Lautsprecherchassis in Gehäuse, der gezielten Manipulation des Schalldruckverlaufes.

Kapitel 4

Gehäusebauformen

Um zu verhindern, daß von der Membranrückseite abgestrahlte Schallenergie den nach vorne abgestrahlten Anteil auslöscht (akustischer Kurzschluß), oder um die Federsteife des schwingenden Systems zu erhöhen, muß das Lautsprecherchassis in ein Gehäuse eingebaut werden. Gehäuse gibt es in den verschiedensten Varianten: als geschlossene Box, Baßreflex-Box, Transmission-Line-Box oder als Baßhorn. Auch Kombinationen zwischen Baßreflex-Box und Baßhorn oder Baßreflex-Box und Transmission-Line-Box sind möglich, haben aber heute an Bedeutung verloren und sind nur noch selten zu finden.

Wenn es nur darum geht, den akustischen Kurzschluß zu vermeiden, dann genügt auch eine einfache Schallwand, bei der einige Probleme des Gehäuseeinbaus erst gar nicht auftreten. Zur Wiedergabe tiefer Frequenzen muß die Schallwand allerdings sehr groß werden, da die Schallwellen hier einige Meter lang sind. Das macht den Einsatz meist unpraktikabel. Der prinzipielle Aufbau ist in den Bildern 4.1a und 4.1b dargestellt.

Bei tiefen Frequenzen (große Wellenlänge und langsame Membranbewegung) bewegen sich die von der Membran verschobenen Luftmoleküle um die Schallwand herum zur gegenüberliegenden Membranseite (Bild 4.1a). Die Schallwand müßte für die Wiedergabe von Frequenzen bis zu 20 Hz einen Durchmesser von etwa 6 m haben. Das macht die ganze Sache dann doch etwas unhandlich. Erst oberhalb der Frequenz, deren Wellenlänge kleiner

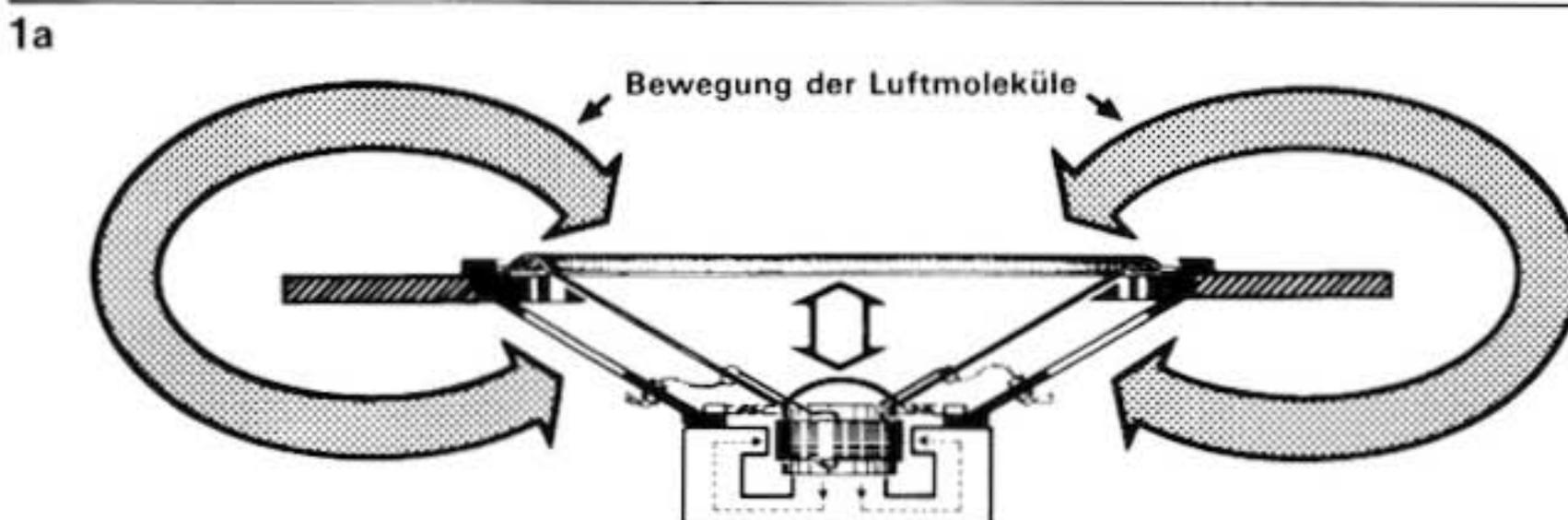
ist als der Umfang der Schallwand, strahlen beide Membranseiten Schallenergie ab. Das System arbeitet als Dipolstrahler, bei dem die meiste Schallenergie senkrecht zur Membranfläche abgestrahlt wird.

Geschlossene Lautsprecherboxen

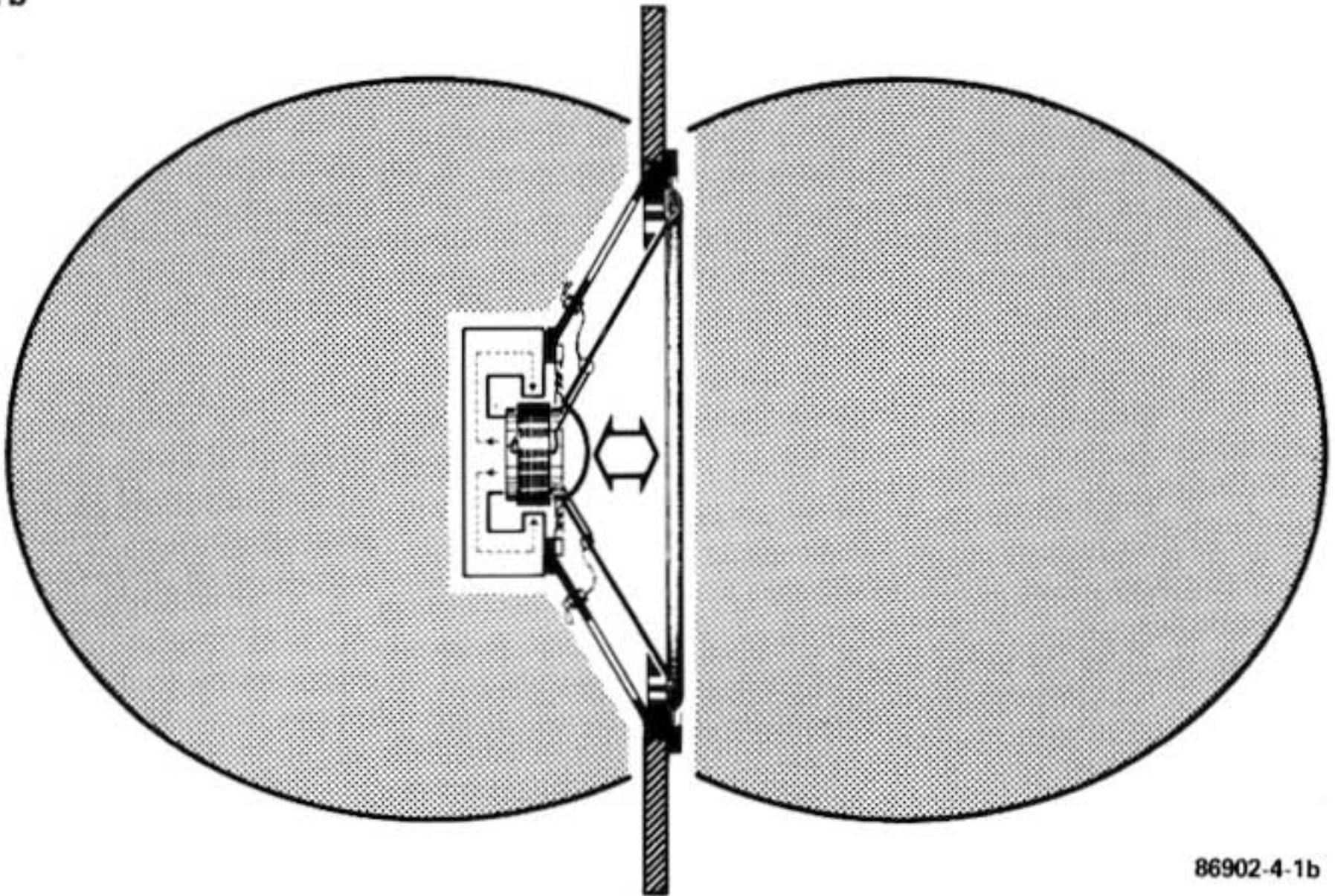
Ein geschlossenes Gehäuse wirkt bei geringeren Abmessungen ebenso wie eine unendlich grosse Schallwand (daher die Bezeichnung IB = infinite Baffle), wodurch der akustische Kurzschluß vermieden wird. Für andere Gehäuse gilt das oberhalb einer berechenbaren Frequenz, auch wenn das Gehäuse eine deutlich sichtbare Öffnung aufweist.

Aber das geschlossene Gehäuse bewirkt noch mehr. Die Luft im Gehäuse wirkt als Feder auf die Membranbewegung und erhöht so die Resonanzfrequenz f_c und Q_{tc} des eingebauten Chassis. (Das c steht hier für case und beschreibt die Werte nach dem Einbau.) Die Erhöhung der Federsteife kann positiv sein. Da die Luft erst bei größeren Kompressionen ein

Bild 4.1a. Bei tiefen Frequenzen (große Wellenlänge und langsame Membranbewegung) bewegen sich die von der Membran verschobenen Luftmoleküle um die Schallwand herum zur gegenüberliegenden Membranseite. Dieser Druckausgleich verhindert jede Schallabstrahlung.



1b



86902-4-1b

Bild 4.1b. Oberhalb der Frequenz, deren Wellenlänge kleiner als der Umfang der Schallwand ist, strahlen beide Membranseiten Schallenergie ab. Das System arbeitet als Dipolstrahler, bei dem die meiste Schallenergie senkrecht zur Membranfläche abgestrahlt wird. Zur Wiedergabe tiefer Frequenzen sind sehr große Schallwände notwendig (etwa 6 m Durchmesser für 20 Hz); das macht die Anordnung unhandlich.

nichtlineares Verhalten zeigt, ist mit Langhub-Chassis, deren Antrieb und Membranaufhängung linear arbeiten, eine große lineare Auslenkung zu erzielen. Bei Chassis mit hohem Q_{ts} kann die Erhöhung der Federsteife aber zu untolerierbaren Gehäusegrößen oder Q_{tc} -Werten führen. Hier muß etwas getrickst werden. Daneben können aber auch höchst negative Aspekte durch die Gehäuse auftreten. Das sind einmal Resonanzen im Innern. Zum anderen kann vom Chassis abgestrahlte Schallenergie über den Koinzidenzeffekt mit kurzer

zeitlicher Verzögerung wieder an die Außenwelt treten.

Zu den negativen Aspekten. Gehäuseresonanzen sind im Grunde das gleiche wie die bereits bekannten Raumresonanzen des Abhörraumes, nur sind die Frequenzen höher. Bei rechteckförmigen Boxen gibt es für jedes Volumen eine optimale Proportion von Höhe, Tiefe und Breite. Das optimale Verhältnis reduziert den klanglichen Einfluß der Resonanzen auf ein unhörbares Maß. Es ist also nicht nötig (und manchmal sogar falsch), Lautsprecherboxen in Pyramidenform, dreieckig oder sonstwie exotisch geformt aufzubauen. Auch alle großen Studiomonitore, bei denen es auf den Preis für das Gehäuse nun wirklich nicht ankommt, sind in Rechteckform aufgebaut. Wie in der Raumakustik ist auch hier eine gleichmäßige Verteilung vieler Resonanzen besser als resonanzarme Gehäuse, in denen noch immer einige störende Resonanzen auftreten. Es gibt natürlich einige Formen, die akustisch ebenso ungeeignet sind, wie viele Wohnräume. Das gilt z.B. für säulenförmige Gehäuse, berechnen Sie einmal die Resonanzverteilung

für ein solches Gehäuse mit den Innenmaßen $100 \times 20 \times 20$ cm.

Der Koinzidenzeffekt (in der Bauakustik ein gut bekannter und gefürchteter Störenfried) ist einfach zu erklären, nur, damit ist leider nicht viel gewonnen. Jedes Material hat eine Schallgeschwindigkeit, deren Größe von den Masse- und Federelernen des Materials abhängt. Die Schallgeschwindigkeit c für Luft bei 20 Grad Celsius ist 344 m/s. In anderen Materialien hat die Schallgeschwindigkeit andere Werte; einige Beispiele:

Wasser	= 1480 m/s
Salzwasser	= 1520 m/s bei 21 Grd und 3,5% Salzgehalt
Plexiglas	= 1800 m/s
Holz weich	= 3350 m/s
Beton	= 3400 m/s
Weichstahl	= 5050 m/s
Aluminium	= 5150 m/s
Glas	= 5200 m/s
Gipskarton	= 6800 m/s

2

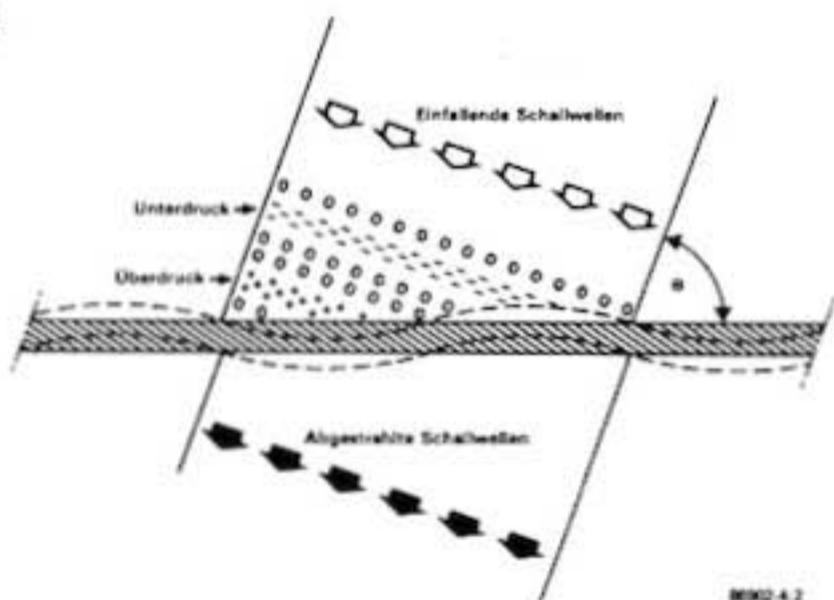


Bild 4.2. Der Koinzidenzeffekt verursacht nicht nur in der Bauakustik viel Ärger. Auch bei Lautsprechergehäusen kann er dazu führen, daß die Schallabstrahlung durch die Gehäusewände nur unwesentlich leiser ist als durch die Membran. Für den kritischen Winkel gilt:

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{\lambda_w}$$

λ = Schallgeschwindigkeit der Luft

λ_w = Schallgeschwindigkeit der Gehäusewand

(Ahnen Sie jetzt, warum Gehäuse mit doppelten Wänden und sandgefüllten Zwischenräumen oft so gut klingen?)

(Die hohe Schallgeschwindigkeit unter Wasser erklärt auch die Schwierigkeiten der Stereoor- tung unter Wasser, denn der Abstand Ihrer Ohren zur Schallquelle wird akustisch auf $1/4,366$ reduziert. Der Faktor $1/4,366$ ist der Quotient aus der Schallgeschwindigkeit des Wassers und der Luft.)

Der Schall pflanzt sich also in jedem Material mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit fort. Das gilt auch für Lautsprechermem- branen und Gehäusewände. Der Koinzidenz- effekt verwandelt das Verhältnis von c -Luft zu c -Material in einen Winkel. Fällt eine Schall- welle aus diesem Winkel auf eine Gehäuse- wand oder auf eine Membran, so passiert das, was in Bild 4.2 skizziert ist.

Die Schallwelle regt eine Welle gleicher Fre- quenz mit entsprechend größerer Wellenlänge in der (Gehäuse)Wand an, die für sehr wirk- ungsvolle Schallabstrahlung auf der anderen Seite sorgt. Weiterhin entsteht dabei eine Schubkomponente, die eine Longitudinalwelle im Material anregt. Das ist die Ursache dafür, daß Sie oft gut über den Musikgeschmak Ihrer Untermieter fünf Etagen tiefer informiert sind. Genauso ist es bei den Lautsprechergehäusen. Da hier nur der Einfallswinkel einer Schallwelle eine Rolle spielt, bringen auch exotische Ge- häuseformen wie Pyramiden kein besseres Er- gebnis, als rechteckige Kisten. Wenn von der Schallenergie, die in das Gehäuse abgestrahlt wird, etwas im falschen Winkel auf Gehäuse- wände oder Membran trifft, dann ist sie schon wieder so gut wie draußen in Ihrem Hörraum. Leider geschieht dies zeitverzögert. Besonders störend ist dabei die Abstrahlung mittlerer und höherer Frequenzen durch die Membran oder Frontwand hindurch, die das Gehör als neuer Direktschall bewertet.

Um Koinzidenzeffekte bei Gehäusewänden zu vermeiden, werden sie aus verschiedenem Material mit unterschiedlicher Schallge- schwindigkeit aufgebaut, z.B. aus Holz/Bitu- menmasse, Hartholz/Weichholz oder Weich- holz/Marmor. Der Koinzidenzeffekt ist damit ausgeschaltet.

Bei Membranen geht das leider nicht. Zumin- dest aus diesem Grund muß jedes Lautspre- chergehäuse mit einem schallabsorbierenden Material gefüllt werden, das die Schallenergie mittlerer und höherer Frequenzen ausreichend schnell abbaut. Das Dämmmaterial verkompliziert leider die Berechnungen bei der Gehäuse- dimensionierung; wir werden noch darauf zu

sprechen kommen. Es sind also nicht nur positive Aspekte, die das Dämmaterial bei der Lautsprecherkonstruktion mit sich bringt.

Bei einer einfachen Schallwand gibt es alle diese Probleme nicht, dafür ist hier an den Parametern f_s und Q_{ts} der verwendeten Chassis nicht viel zu ändern. Vorwiderstände erhöhen Q_{ts} nach Belieben auf einen gewünschten Wert Q_{tc} , aber sie reduzieren den Wirkungsgrad und Schallpegel des Chassis, was weniger beliebt ist. Zusätzliche Masse bewirkt auch eine Änderung von f_s und Q_t , aber auch hier bricht wieder der Schallpegel zusammen. (z.B. verursacht jede Verdoppelung der bewegten Masse eine Verringerung des Wirkungsgrades um 12 dB.) Bei den Aktivlösungen ist das auch nicht anders. Eine elektronische Anhebung tiefer Frequenzen benötigt ebenfalls mehr elektrische Leistung, ähnlich wie bei einem Chassis mit geringerem Wirkungsgrad. Nur mit speziell aufeinander abgestimmten Chassis und Endverstärkern sind hier bessere Ergebnisse möglich (siehe Kapitel 5). Ein Beispiel für eine passive Korrektur der Wiedergabekurve:

Ein Mitteltonchassis hat die Werte $f_s = 100$ Hz, $Q_{ts} = 0,35$; dabei sind $Q_{es} = 0,42$ und $Q_{ms} = 2,20$.

Wird ein Widerstand von 6,8 Ohm vor die Schwingspule mit $R_{dc} = 6,8$ Ohm geschaltet, ändert sich Q_{ts} auf 0,61. Dadurch könnte das Chassis jetzt bereits ab etwa 200 Hz eingesetzt werden; das ergibt sich aus dem Quotienten von f_s zu Q_{ts} . Ohne Vorwiderstand weist das Chassis erst ab etwa 300 Hz einen linearen Schalldruckverlauf auf. Leider ist der Wirkungsgrad des Chassis durch diesen Vorwiderstand um 6 dB reduziert worden.

Das Gehäuse bewirkt eine Anhebung der Federsteife des schwingenden Systems. Es gilt:

$$V_{as} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{ms} \cdot S_d^2$$

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_{box}}$$

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{\alpha + 1}$$

Wir können damit beliebige höhere Resonanzfrequenzen einstellen, wobei Q_{tc} proportional zu f_c ansteigt (ohne Einfluß des Dämmaterials). Anders formuliert: Wir müssen es machen, um einen bestimmten Wert für Q_{tc} zu erzielen.

Wir benötigen für jede geplante Box im Tiefbereich eine bestimmte Einbaugüte Q_{tc} , die bei der Resonanzfrequenz des eingebauten Chassis wirksam werden muß. Das ist entweder erforderlich, um eine Box 2ter Ordnung für eine bestimmte Aufstellung im Raum zu optimieren (siehe die Tabelle im Kapitel Raumakustik), oder um eine Baßreflexbox bzw. eine geschlossene Box höherer Ordnung zu konstruieren.

Bei diesen Boxen bestimmt die gewünschte Übertragungsfunktion die Werte für Q_{tc} , die für eine Butterworth-Abstimmung benötigt werden. Die Resonanzfrequenz f_c des eingebauten Chassis ergibt sich dann aus der Berechnung. Die Werte stehen in der Tabelle für die Berechnung gefilterter Lautsprecherboxen in Kapitel 3. Weiterhin ist der vorgeschriebene Wert für Q_{tc} wichtig, wenn das Chassis als ein Teil der Frequenzweiche berechnet wird, wie es z.B. bei den Hochpaß-Filtern 4ter Ordnung mit nur zwei Bauteilen für die Frequenzweiche der Fall ist.

Beginnen wir mit einer geschlossenen Box 2ter Ordnung. Für ein Filter 2ter Ordnung, eine geschlossene Lautsprecherbox, ist die Einbaugüte $Q_{tc} = 0,707$. Es muß also beim Einbau eines Chassis das Gehäusevolumen gewählt werden, das die Güte Q_{ts} des Chassis auf den Einbauwert $Q_{tc} = 0,707$ erhöht.

Die Resonanzfrequenz des Chassis erhöht sich durch den Einbau auf die Frequenz f_c . Ohne den Einfluß zusätzlicher Widerstände, wie Reibung oder elektrischer Widerstand, gilt:

$$\frac{f_s}{f_c} = \frac{Q_{ts}}{Q_{tc}} \quad \frac{f_c}{f_s} = \frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}$$

Das ergibt eine proportionale Änderung der Werte. Gleichzeitig ist bei dem Butterworth-Filter 2ter Ordnung die Resonanzfrequenz des eingebauten Chassis auch die -3 dB Frequenz der Lautsprecherbox. Diese läßt sich für verschiedene Lautsprecherchassis schnell kalkulieren:

$$f_{-3 \text{ dB}} = 0,707 \frac{f_s}{Q_{ts}}$$

Je nach dem können Sie natürlich auch andere Boxen berechnen, in der Tabelle aus Kapitel 3 sind die Werte für folgende Boxen gelistet: geschlossene Box 2ter Ordnung Butterworth geschlossene Box 3ter Ordnung Butterworth mit ext. Kondensator

geschlossene Box 4ter Ordnung Butterworth mit L-C Glied/aktiv
 geschlossene Box 5ter Ordnung Butterworth mit L-C Glied/aktiv
 geschlossene Box 6ter Ordnung Butterworth mit L-C Glied/aktiv

Für Filter höherer Ordnung kommen dabei verschiedene Einbaugüten Q_{tc} in Frage. Die Ursache dafür ist die Tatsache, daß hier die Übertragungsfunktion durch mehrere kombinierte Filterstufen erzeugt wird, wobei man die Gütewerte der einzelnen Stufen untereinander vertauschen kann. (Wir werden das gleiche Prinzip noch bei den gefilterten Baßreflexboxen 6ter Ordnung wiederfinden.)

Wir können uns aber auch hier jede gewünschte Box mit Hilfe von Q_{ts} und Q_{tc} berechnen. Als Beispiel folgt die Berechnung einer Box 2ter, 3ter und 4ter Ordnung. Wir nehmen ein Chassis, das folgende Daten aufweist:

- $Z = 8 \text{ Ohm}$
- $Z_{\min} = 7 \text{ Ohm bei } 100 \text{ Hz}$
- $R_{dc} = 5,5 \text{ Ohm}$
- $f_s = 18,57 \text{ Hz}$
- $C_{ms} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m/N}$
- $Q_{ms} = 4,0$
- $Q_{es} = 0,23$
- $Q_{ts} = 0,21$
- $R_{ms} = 1,92 \text{ kg/s}$
- $S_d = 0,0687 \text{ m}^2$
- $M_{md} = 0,06617 \text{ kg}$
- $Bl = 14,68 \text{ N/A}$
- $V_{as} = 0,7315 \text{ m}^3$

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{md} \cdot C_{ms}}}$$

$$Q_{es} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{\frac{(Bl)^2}{R_{dc}}}$$

$$Q_{ms} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{R_{ms}}$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}$$

Eine geschlossene Box 2ter Ordnung hat bei Butterworth-Abstimmung einen Q_{tc} -Wert von 0,707. Daraus errechnet sich die neue Resonanzfrequenz (das ist gleichzeitig die -3 dB Frequenz) nach folgendem Schema:

$$f_c = f_s \cdot 3,666 = 62,5 \text{ Hz}$$

$$\frac{0,707}{Q_{ts}} = 3,366$$

Das ist die neue Resonanz- und -3 dB Frequenz für das eingebaute Chassis (Butterworth 2ter Ordnung). Vergleichen wir das Ergebnis mit der Butterworth-Abstimmung 3ter Ordnung. Hierfür ist der Wert von Q_{tc} laut Tabelle 0,943. Das bedeutet für die Resonanzfrequenz:

$$\frac{0,943}{Q_{ts}} = 4,49$$

$$f_c = f_s \cdot 4,49 = 83,4 \text{ Hz}$$

In diesem Fall entspricht die Resonanzfrequenz nicht gleichzeitig der -3 dB Frequenz, da die Einbau-Resonanzfrequenz (3ter Ordnung) um den Faktor 1,414 über der -3 dB Frequenz liegt. Die Tabelle zeigt das in der 3. Spalte.

Die -3 dB Frequenz errechnet sich nach folgender Beziehung:

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{83,4}{1,414} = 59 \text{ Hz}$$

Gegenüber dem ersten Fall liegt die -3 dB Frequenz jetzt 3,5 Hz niedriger. Die höhere Einbau-Resonanzfrequenz deutet jedoch schon darauf hin, daß wir daneben mit einem deutlich kleineren Gehäuse auskommen.

Wählen wir eine Butterworth-Abstimmung 4ter Ordnung, hat Q_{tc} entweder den Wert 0,89, 1,307 oder 0,541. Der erste Wert gilt für die Ansteuerung über passive Bauteile, in den anderen Fällen muß ein aktives Filter vor den Endverstärker geschaltet werden. Die Berechnung beginnt mit dem passiven Beispiel:

$$\frac{0,89}{Q_{ts}} = 4,24$$

$$f_c = f_s \cdot 4,24 = 78,7 \text{ Hz}$$

Die Einbau-Resonanzfrequenz liegt entweder um den Faktor 1,758 über der -3 dB Frequenz oder um den Kehrwert ($1/1,758 = 0,569$) darunter:

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{78,7}{1,758} = 44,8 \text{ Hz}$$

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{78,7}{0,569} = 138,3 \text{ Hz}$$

Dieser Fall ist für die Berechnung von passiven Frequenzweichen und bei der Konstruktion von Subwoofer-Satelliten Kombinationen in-

interessant. Auch hier werden die benötigten Gehäuse kleiner als bei einer geschlossenen Box 2ter Ordnung.

Zum Abschluß die aktiv angesteuerten Versionen; dabei hat Q_{tc} einen Wert von 1,307. Es gilt:

$$\frac{1,307}{Q_{ts}} = 6,22$$

$$f_c = f_s \cdot 6,22 = 115,6 \text{ Hz}$$

$$\frac{0,541}{Q_{ts}} = 2,58$$

$$f_c = f_s \cdot 2,58 = 47,8 \text{ Hz}$$

In diesem Fall sind Einbau-Resonanz- und -3 dB Frequenz wieder identisch. Große Unterschiede gibt es beim Gehäusevolumen; das Gehäuse für den Q_{tc} -Wert von 1,307 kann sehr klein werden. Das ist ideal für Subwoofer-Satelliten Kombinationen. Daneben bietet sich hier die Möglichkeit, Chassis mit sehr hohem Q_{ts} -Wert in ein Gehäuse einzubauen und dennoch den (maximal flachen) Butterworth-Verlauf bei der Schalldruckwiedergabe zu erzielen. (Das wäre sonst nur möglich, wenn man einen speziell auf das eingebaute Chassis abgestimmten Verstärker mit negativer Ausgangsimpedanz einsetzt, oder für große Reibungswiderstände im Gehäuse sorgt. Auf diese Lösungen kommen wir noch zu sprechen.)

Mit diesen Beispielen ist es sicherlich kein Problem mehr, die weiteren Möglichkeiten aus der Tabelle zu berechnen. Werfen wir jetzt einen Blick auf die Berechnung der entsprechenden Gehäuse.

Wir beginnen wieder mit der geschlossenen Box 2ter Ordnung. Hier war $Q_{tc} = 0,707$. Für den idealen Fall ohne weitere Widerstände kann das Volumen direkt aus dem Verhältnis Q_{tc} zu Q_{ts} oder auch aus f_c zu f_s berechnet werden.

Es ist für alle Berechnungen:

$$V_{\text{box}} = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}$$

Die Gleichung liefert hier für die Box 2ter Ordnung den Wert:

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,707}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0708 \text{ m}^3 = 70,8 \text{ l}$$

Für die Box 3ter Ordnung errechnen wir ebenso:

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,943}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0382 \text{ m}^3 = 38,2 \text{ l}$$

Bei den Boxen 4ter Ordnung finden wir folgende Werte:

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,890}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0431 \text{ m}^3 = 43,1 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,890}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0431 \text{ m}^3 = 43,1 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{1,307}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0194 \text{ m}^3 = 19,4 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,541}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,1297 \text{ m}^3 = 129,7 \text{ l}$$

Es ist also möglich, mit der Tabelle die nötigen Gehäuse und die jeweiligen Resonanz- und -3 dB Frequenzen zu berechnen, ohne sich mit den Werten für L und C in der Tabelle kümmern zu müssen.

Zur Berechnung vorgeschalteter Filter ist es dagegen notwendig, sich etwas mit den normierten Werten in der Tabelle zu befassen.

Dazu wollen wir unsere Arbeit nun einmal an den einfachen L-C-R- Ersatzschaltbildern überprüfen. Die Tabelle listet normierte Werte. Es ist daher immer notwendig, die Werte mit dem tatsächlichen Widerstand R und dem BI-Produkt zu denormieren. Das klingt schwieriger, als es ist.

Zuerst ersetzen wir Masse und Nachgiebigkeit des Chassis durch Werte des Ersatzschaltbildes. Zur Erinnerung:

$$C \text{ im Ersatzschaltbild für } M_{md} = \frac{M_{md}}{(BI)^2}$$

$$L \text{ im Ersatzschaltbild für } C_{ms} = C_{ms} \cdot (BI)^2$$

Ein kurzer Check am Ersatzschaltbild zeigt:

$$C \text{ für } M_{\text{md}} = \frac{0,06617}{14,68^2} = 0,000307 \text{ (Farad)}$$

$$L \text{ für } C_{\text{ms}} = 0,00111 \cdot 14,68^2 = 0,239 \text{ (Henry)}$$

(Das Chassis ist noch nicht eingebaut.)

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \cdot L}} = \frac{1}{6,28 \cdot \sqrt{0,000307 \cdot 0,239}} = 18,6 \text{ Hz}$$

Für das eingebaute Chassis ist die Federsteife größer (und die Nachgiebigkeit C_{mc} von Chassis und Gehäuseluft entsprechend kleiner), so daß L kleiner wird:

$$L \text{ für } C_{\text{mc}} = \frac{C_{\text{ms}}}{\frac{V_{\text{as}}}{V_{\text{box}}} + 1} \cdot (Bl)^2$$

$$L \text{ für } C_{\text{mc}} = 0,0000978 \cdot 14,68^2 = 0,0211 \text{ (Henry)}$$

Die Berechnung der Resonanzfrequenz dieses Schwingkreises:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,000307 \cdot 0,0211}} = 62,5 \text{ Hz}$$

Die Werte im Ersatzschaltbild sind auf $R = 1 \text{ Ohm}$ und $2\pi \cdot f = 1$ normiert. Wenn wir jetzt noch mit $R = 1$ und $2\pi \cdot f_c = 1$ rechnen, muß sich für C der Wert 0,707 und für L der Wert 1,414 (siehe Tabelle) ergeben. Zur Erinnerung: Die Werte aus der Tabelle können zu Werten des Ersatzschaltbildes denormiert werden, wenn man sie durch einen bestimmten Faktor dividiert:

$$C_{\text{normiert}} \text{ (Tabelle) durch: } 2\pi \cdot f_s \text{ (oder } f_c) \cdot R$$

$$L_{\text{normiert}} \text{ (Tabelle) durch: } \frac{R}{2\pi f_s \text{ (oder } f_c)}$$

Ebenso lassen sich die Werte des Ersatzschaltbildes normieren, wenn wir umgekehrt verfahren. Nur, wenn wir die gefundenen Werte des Ersatzschaltbildes, hier $C = 0,000307 \text{ F}$ und $L = 0,0211 \text{ H}$ jetzt mit R_{dc} und f_c normieren, so finden wir:

$$C_{\text{normiert}} = 0,663 \text{ auf } R_{\text{dc}} = 5,5 \text{ Ohm}$$

$$(C \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot R_{\text{dc}})$$

$$L_{\text{normiert}} = 1,5065 \text{ auf } R_{\text{dc}} = 5,5 \text{ Ohm}$$

$$\left(L \frac{2\pi \cdot f_c}{R_{\text{dc}}} \right)$$

Das stimmt noch nicht so ganz mit den Werten der Tabelle überein.

Wir haben den Reibungswiderstand R_{ms} vergessen und statt für Q_{tc} hier für Q_{ec} gerechnet. Dieser Punkt wurde bereits angesprochen. Es folgen jetzt Beispiele, wie sich jeder Widerstand R_{mc} in die Berechnungen einbeziehen läßt, wenn die Werte des Ersatzschaltbildes normiert werden sollen.

Die Güte dieser LC Kreise ist

$$Q_{\text{tc}} = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$Q_{\text{tc}} = 5,5 \sqrt{\frac{0,000307}{0,239}} = 0,663$$

Auch die Güte Q_{tc} in unserer Rechnung entspricht nicht dem Wert in der Tabelle. Der bereits berechnete Wert für C normiert hat das bereits angedeutet. Der Q_{tc} -Wert sollte 0,707 sein.

Jeder Reibungswiderstand wirkt wie ein dämpfendes Element auf den Schwingkreis Lautsprecher und muß deshalb in die Berechnungen einbezogen werden. Hier haben wir vorerst den Reibungswiderstand der Membranaufhängung zu berücksichtigen. Ein Lösungsweg: Wenn Reibung und elektrische Bedämpfung bei einem Lautsprecherchassis gleich groß sind, dann ist:

$$Q_{\text{ts}} = 0,5 \cdot Q_{\text{es}} = 0,5 \cdot Q_{\text{ms}}$$

Es gilt immer:

$$\frac{1}{Q_{\text{ts}}} = \frac{1}{Q_{\text{es}}} + \frac{1}{Q_{\text{ms}}}$$

In Zahlen:

$$\frac{1}{0,707} = \frac{1}{1,414} + \frac{1}{1,414}$$

Die elektrische Bedämpfung trägt also genau die Hälfte zur Dämpfung des Systems bei.

Wie bereits erwähnt, ist die Güte eines L-C-R-Schwingkreises:

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Wenn elektrische und mechanische Bedämpfung gleich groß sind, also die Gütewerte für Q_{es} und Q_{ms} gleich sind, wird bei Berechnungen mit R_{dc} alleine der Wert für Q um den Faktor 2 zu klein. Wird dagegen R_{dc} verdoppelt, so stimmt das Ergebnis wieder. Wir können durch Vergrößerung von R_{dc} jeden Reibungswiderstand in die Berechnungen einbeziehen, auch den Einfluß von Dämmstoff im Lautsprechergehäuse oder von Variovents, wenn die Werte für Q_{es} und Q_{ms} (oder Q_{ec} und Q_{mc} im Einbaufall) bekannt sind. (Spätestens nach einer einfachen Messung.) In den meisten Fällen unterscheiden sich die Werte für Q_{es} und Q_{ms} voneinander. Um den geeigneten Korrekturfaktor anzubringen, muß R_{dc} um einen kleineren Betrag erhöht werden. In allen Fällen errechnet sich dieser aus Quotient von Q_{es} zu Q_{ts} bzw. Q_{ec} zu Q_{tc} . Der neue Widerstand für $R_{dc} + R_{ms} = R'_{dc}$ wird damit einfach:

$$R'_{dc} = R_{dc} \cdot \frac{Q_{es}}{Q_{ts}}$$

Für das Chassis aus dem Berechnungsbeispiel gelten die Werte:

$Q_{es} = 0,23$ und $Q_{ms} = 4,00$; damit gilt:

$$Q_{ts} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{es}} + \frac{1}{Q_{ms}}} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}$$

Das Verhältnis von Q_{es} zu Q_{ts} :

$$\frac{Q_{es}}{Q_{ts}} = \frac{Q_{es}}{\frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}} = \frac{0,23}{\frac{0,23 \cdot 4,00}{0,23 + 4,00}} = 1,06$$

Der neue Wert R'_{dc} ist für alle Berechnungen am Ersatzschaltbild und der Tabelle:

$$R'_{dc} = R_{dc} \cdot 1,06 = 5,83$$

Damit ist der Einfluß von R_{ms} berücksichtigt.

$$C_{normiert} = 0,703 \text{ auf } R = 5,83 \text{ Ohm}$$

$$L_{normiert} = 1,421 \text{ auf } R = 5,83 \text{ Ohm}$$

Das ist bei den für Lautsprechern üblichen

Meßfehlern für Bl , Q_{ms} und Q_{es} ausreichend genau.

Einige halten diesen Weg jetzt sicherlich für etwas mühsam. Für die Berechnungen geschlossener Boxen gab es ja schon einfachere Wege. Das stimmt, nur spätestens bei der Berechnung der Einflüsse durch Dämmstoff im Gehäuse verlieren die einfachen Methoden ihre Vorteile; bei der Berechnung passiv gefilterter Lautsprecher (auch bei Frequenzweichen) helfen sie überhaupt nicht weiter.

Wer sich dagegen etwas mit diesem Weg über die normierten Werte der Übertragungsfunktionen befaßt, kann ohne große Rechnerei beliebige Lautsprecherboxen oder Kombinationen von Lautsprecherchassis und Frequenzweichen analysieren oder auch konstruieren. Die Berechnungen funktionieren mit allen gewünschten Übertragungsfunktionen, also auch bei der Berechnung von Bessel- und Allpaß-Filtern in Frequenzweichen bei denen das Chassis als Hochpaß immer einen Teil der Frequenzweiche darstellt. Wir haben uns in diesem Buch aber bewußt erst einmal auf die Butterworth-Filter beschränkt, um die Berechnungen nicht zu unübersichtlich werden zu lassen.

Betrachten wir die Box 3ter Ordnung, wie finden wir den Wert des vorgeschalteten Kondensators? Die Werte der Tabelle:

$$C_{normiert} = 0,667 \quad Q_{tc \text{ normiert}} = 0,943$$

$$L_{normiert} = 0,750 \quad f_c \text{ normiert} = 1,414$$

$$Cx_{normiert} = 2,000$$

Wir denormieren diese Werte in die Werte des Ersatzschaltbildes, wobei jetzt wieder mit verringertem Widerstand R'_{dc} gerechnet wird ($R'_{dc} = 5,83 \Omega$ entsprechend $R_{dc} = 6,18 \Omega$):

$$C = \frac{C_{norm}}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}} \cdot R'_{dc}} = \frac{M_{md}}{(Bl)^2}$$

$$L = L_{norm} \frac{R'_{dc}}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}}} = C_{mc} \cdot (Bl)^2$$

C = Kondensator im Ersatzschaltbild

L = Spule im Ersatzschaltbild

C_{norm} = normierter Wert in der Tabelle

L_{norm} = normierter Wert in der Tabelle

Die bewegte Masse des Chassis, sowie Bl und R'_{dc} sind vorgegeben.

Für die -3 dB Frequenz zur weiteren Berechnung gilt:

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{(Bl)^2 \cdot C_{norm}}{2\pi \cdot R_x \cdot M_{md}}$$

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{14,68^2 \cdot 0,667}{6,28 \cdot 5,83 \cdot 0,06617} = 59,3 \text{ Hz}$$

Der Wert für L im Ersatzschaltbild und damit die notwendige Nachgiebigkeit C_{mc} von Chassis und Gehäuseluft ergibt sich beim Einsetzen in:

$$L = \frac{L_{\text{norm}} \cdot R'_{dc}}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}}} = 0,0116 \text{ Henry}$$

Weiter in Kurzform.

$$L = C_{mc} \cdot (Bl)^2$$

$$C_{mc} = \frac{L}{(Bl)^2}$$

$$C_{mc} = \frac{0,0116}{14,68^2}$$

$$= 0,0000542$$

$$\frac{C_{ms}}{C_{mc}} = \frac{0,00111}{0,0000542} = 20,5$$

Das ist gut 20-fach kleiner als die Nachgiebigkeit C_{ms} der Membranaufhängung. Abzüglich der Nachgiebigkeit Membranaufhängung, die hier immer den Wert 1 hat, ist der Wert für $\alpha = 19,5$ ($20,5 - 1$).

Das benötigte Volumen für das Lautsprechergehäuse beträgt jetzt:

$$V_{\text{box}} = \frac{V_{as}}{\alpha} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{19,5} = 0,0375 \text{ m}^3$$

Eine Kontrolle über die bekannte Gleichung für f_c über die Werte für M_{md} und C_{mc} ergibt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{md} \cdot C_{mc}}} = \frac{1}{6,28 \sqrt{0,06617 \cdot 0,0011}} = 84 \text{ Hz}$$

Da die Resonanzfrequenz bei dieser Box 3ter Ordnung um den Faktor 1,414 über der -3 dB

Frequenz liegt (siehe Tabelle Spalte f_c), ist:

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{f_c}{1,414} = 59,4 \text{ Hz}$$

Der vorgeschaltete Kondensator C_x errechnet sich jetzt über diese -3 dB Frequenz und R'_{dc} aus dem normierten Wert der für C_x in der Tabelle steht:

$$C_x = \frac{C_{x_{\text{norm}}}}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}} \cdot R'_{dc}} = \frac{2,000}{6,28 \cdot 59,4 \cdot 5,83}$$

$$= 0,0009192 \text{ Farad oder } 91,92 \text{ Mikروفarad}$$

Fazit: Die Box mit vorgeschaltetem Kondensator C_x ist trotz etwas geringerer -3 dB Frequenz nur noch halb so groß.

Der Vollständigkeit halber, aber nur in Kurzform, folgt noch die Berechnung für die Boxen 4ter Ordnung.

$$f_c = f_s \frac{0,89}{Q_{ts}} = f_s \cdot 4,24 = 78,7 \text{ Hz}$$

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{78,7}{1,758} = 44,8 \text{ Hz}$$

(für den Faktor 1,758)

$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{78,7}{0,569} = 138,3 \text{ Hz}$$

(für den Faktor $\frac{1}{1,758}$)

Bei den aktiv angesteuerten Boxen ist $f_c = f_{-3 \text{ dB}}$:

$$f_c = f_s \frac{1,307}{Q_{ts}} = f_s \cdot 6,22 = 115,6 \text{ Hz}$$

$$f_c = f_s \frac{0,541}{Q_{ts}} = f_s \cdot 2,58 = 47,8 \text{ Hz}$$

Die benötigten Gehäusevolumen, berechnet über Q_{tc} zu Q_{ts} :

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,890}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0431 \text{ m}^3 = 43,1 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,890}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0431 \text{ m}^3 = 43,1 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{1,307}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,0124 \text{ m}^3 = 12,4 \text{ l}$$

$$V_{\text{box}} = \frac{0,7315 \text{ m}^3}{\left(\frac{0,541}{0,21}\right)^2 - 1} = 0,1297 \text{ m}^3 = 129,7 \text{ l}$$

Die Bauteile vor den passiven Boxen werden mit Hilfe der Tabelle sowie den Werten für $f_{-3 \text{ dB}}$ und R'_{dc} berechnet:

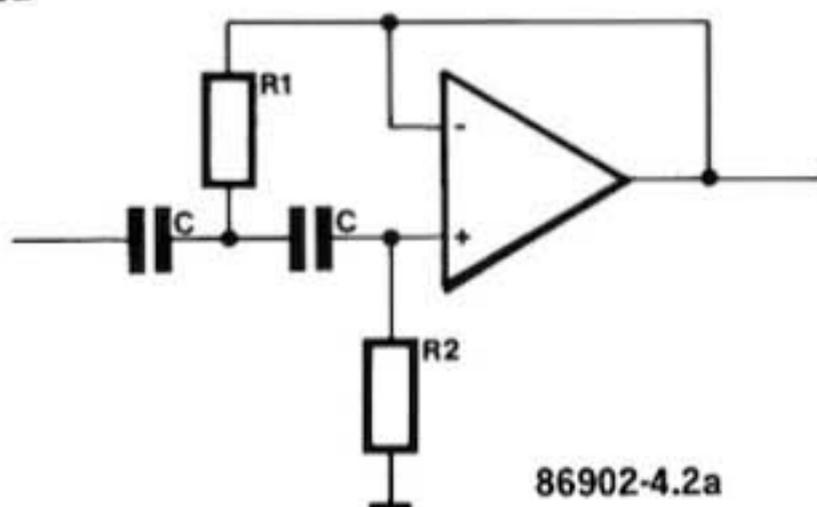
$$C_x \text{ (C extern)} = \frac{C_{\text{norm}}}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}} \cdot R}$$

$$L_x \text{ (L extern)} = L_{\text{norm}} \frac{R}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}}}$$

Die 1. Box hat folgende Werte:
 $C_x = 0,000954 \text{ F} = 95,4 \text{ Mikrofarad}$
 $L_x = 0,040200 \text{ H} = 40,2 \text{ Millihenry}$
 Die Werte der 2. Box:
 $C_x = 0,000100 \text{ F} = 10,0 \text{ Mikrofarad}$
 $L_x = 0,004287 \text{ H} = 4,3 \text{ Millihenry}$

Bei einigen Fällen verhindern die Werte für L_x eine passive Realisierung der Box, denn der Preis für Spulen mit 40 mH und geringem Innenwiderstand wird höher als der Preis für aktive Lösungen. Aktive Lösungen benötigen ein Hochpaß-Filter 2ter Ordnung (Bild 4.2a), dessen Grenzfrequenz gleich der -3 dB Frequenz ist. Das Filter wird vor den Verstärker geschaltet. Die Filtergüte Q_f für die Boxen 4ter Ordnung entweder auf $Q_f = 0,541$ oder im anderen Fall auf $Q_f = 1,307$ eingestellt.

2a



$$f_{-3 \text{ dB}} = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot \sqrt{R1 \cdot R2}}$$

$$Q_f = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R2}{R1}}$$

3. Box

Aus der Filtergüte Q_f errechnet sich der Wert für $R1$ zu $R2$:

$$\frac{R2}{R1} = 4 \cdot Q_f^2$$

$$= 4 \cdot 0,541^2 = 1,170$$

Der Wert für C (Farad) berechnet sich beim Einsetzen von $R1/R2$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{-3 \text{ dB}} \cdot \sqrt{R1 \cdot R2}}$$

4. Box

Hier gilt:

$$\frac{R2}{R1} = 4 \cdot 1,307^2 = 6,833$$

Sie sind nun in der Lage, alle in der Tabelle aufgelisteten Konstruktionswege nachzuvollziehen. Die Filterschaltung aus Bild 4.2a und deren Berechnung werden wir auch später noch bei der Konstruktion gefilterter Baßreflexboxen wiederfinden. Dort ist ebenfalls ein Hochpaß-Filter 2ter Ordnung eingesetzt, allerdings mit anderen Werten für Q_f .

(Ein kurzer Hinweis hierzu: Aktive Filter erhöhen die Verzerrungen durch die eingesetzten Opamps abhängig von der Filtergüte Q_f und der Filterart. Die Schaltung verdoppelt (bei $Q_f = 0,541$) bzw. vervierfacht (bei $Q_f = 1,307$) die Verzerrungen, die der Opamp laut Datenblatt hat; deshalb sollten nur hochwertige Opamps verwendet werden.)

Zu den aktiven oder halbaktiven Frequenzweichen gehören auch noch Tiefpaß-Filter höherer Ordnung der gleichen Bauart. Die Beschreibung und Berechnung hierzu befindet sich am Ende von Kapitel 5, das sich unter anderem mit weiteren Möglichkeiten der aktiven

Ansteuerung von Lautsprecherchassis befaßt. Wer hier etwas mit verschiedenen Chassis rechnet, kommt oft zu erstaunlichen Ergebnissen. Als Beispiel ein kleines 13 cm Chassis mit den Daten:

$R_{dc} = 7 \text{ Ohm}$, $M_{md} = 10,2 \text{ gr}$, $C_{ms} = 0,0022 \text{ m/N}$, $Bl = 6,6$ und $S_d = 0,0089 \text{ m}^2$
Die -3 dB Frequenz liegt bei 51 Hz und das Gehäuse hat ein Volumen von $3,9 \text{ l}$!

Leider hat die Sache einen Haken. Die mechanische Belastbarkeit des kleinen Chassis ist gering, denn über die geringe Membranfläche wird bei tiefen Frequenzen die Membranauslenkung recht groß.

Eine kleine Analyse der mechanischen Belastung. Der Wirkungsgrad eines Lautsprecherchassis errechnet sich nach folgender Formel:

$$\eta = 9,64 \cdot 10^{-7} \cdot f_s \frac{V_{as}}{Q_{es}} \quad (\text{mit } V_{as} \text{ in } \text{m}^3)$$

Für das kleine Chassis sind das $0,00245$, also $0,2465 \%$, ein trauriger Wert. In dB ausgedrückt heißt das für 1 W elektrischer Leistung in einem Abstand von 1 Meter bei halbkugelförmiger Abstrahlung:

$$112 + 10 \log(0,00246) = 85,8 \text{ dB}$$

Die Zahl 112 ist eine Konstante, deren Ursprung wir bereits in Kapitel 2 angesprochen hatten (Berechnung des Schallpegels für eine bestimmte akustische Leistung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle). Dort wurde zur Berechnung der SWL-Wert der abgestrahlten Leistung herangezogen. Zur Erinnerung:

Schallpegel in dB = SWL - $20 \log r$ - $10 \log 2\pi$
Bei einem Wirkungsgrad von 100 Prozent wäre die akustische Leistung des Chassis für 1 Watt elektrische Leistung ebenfalls 1 Watt . In SWL ausgedrückt wären das 120 dB .

Für 100% Wirkungsgrad und 1 m Abstand ergibt sich hier:

$$p = 120 - 20 \log 1 - 10 \log 2\pi = 112 \text{ dB}$$

Entsprechend wäre die Konstante für kugelförmige Abstrahlung:

$$p = 120 - 20 \log 1 - 10 \log 4\pi = 109 \text{ dB}$$

Die vom Chassis erzeugte akustische Leistung hat einen Wirkungsgrad von nur $0,123 \%$. Das sind bei angegebenen 30 Watt maximaler elektrischer Belastbarkeit nur noch $0,037$ akustische Watt. Für eine Butterworth-Abstimmung ist nach:

$$V_d = 1,09 \sqrt{\frac{P_{ak}}{(f_{-3 \text{ dB}})^2}}$$

mit einer Membranfläche von 89 cm^2 die benötigte Membranauslenkung $8,3 \text{ mm}$ in jede Richtung. Die Abstimmung so kleiner Chassis auf niedrige untere Grenzfrequenzen ist daher in geschlossenen Gehäusen nicht sehr empfehlenswert. Beachten Sie in den Kurven der Bilder 4.3a und 4.3b die Unterschiede im Schalldruckverlauf unterhalb der Resonanzfrequenz.

Das Gehör empfindet eine Verringerung des Schallpegels um etwa 10 dB als nur noch halb so laut. Eine geschlossene Box 2ter Ordnung gibt auch deutlich unter dieser Frequenz noch einen gut hörbaren Schall ab, während es bei Filtern (Boxen) höherer Ordnung schon merklich dünner wird. Das gilt auch für Baßreflexboxen, die unter der Grenzfrequenz ebenfalls eine Verringerung des Schallpegels zwischen 18 und 24 dB/Oktave zeigen.

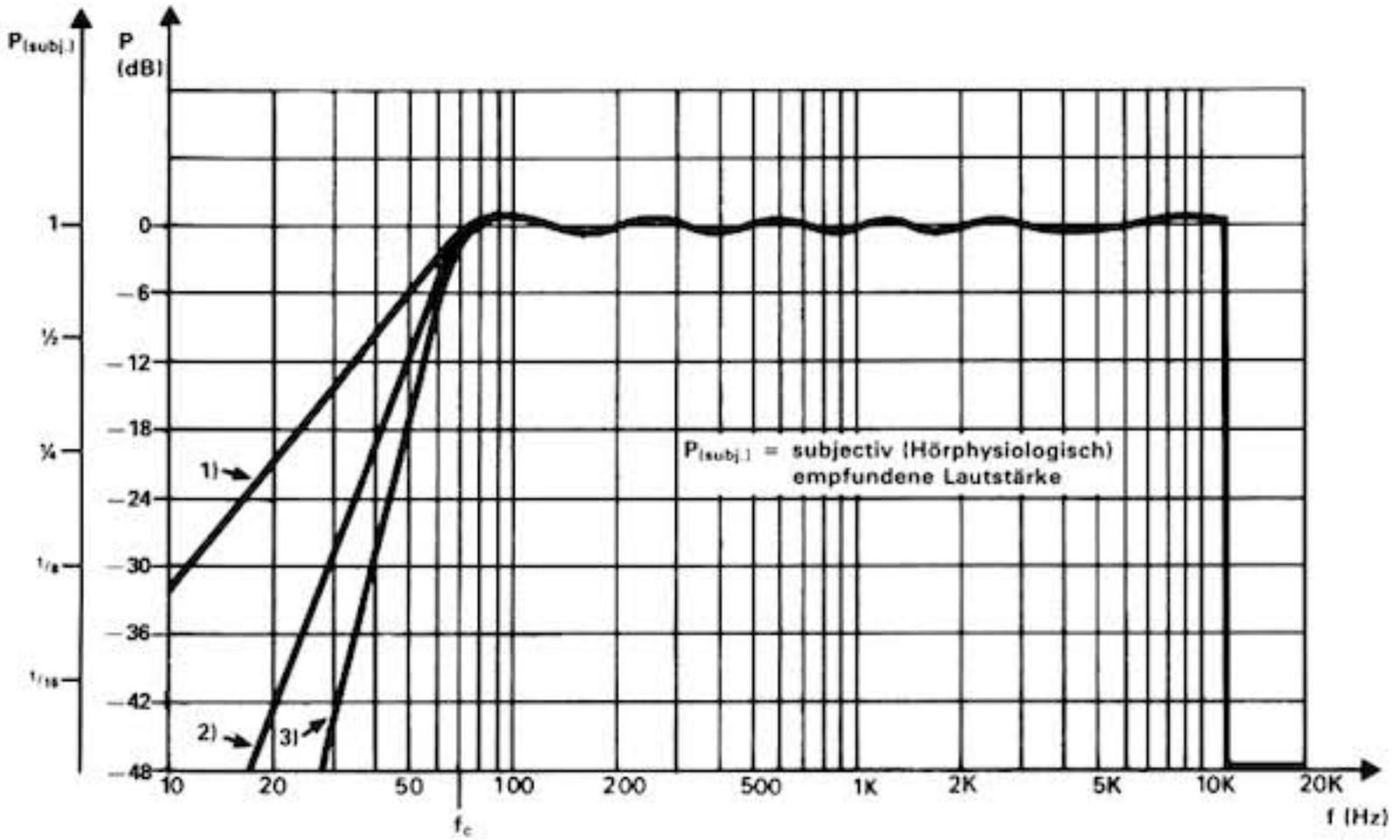
Zur Bewertung der Baßwiedergabe ist die -3 dB Frequenz allein noch nicht geeignet, das Prinzip spielt auch eine Rolle. Sie sollten sich daher immer überlegen, welche untere Grenzfrequenz der Hörraum aufweist und ob der spätere Einsatz eines Subwoofers geplant ist. Beim Aufbau gefilterter Boxen sind natürlich auch andere Abstimmungen als Butterworth möglich, zum Beispiel mit Bessel-Charakteristik. In allen Fällen müssen aber die durch die gewünschte Übertragungsfunktion vorgegebenen Parameter so genau wie möglich eingehalten werden. Ist das nicht der Fall, so kann es zu Fehlabbildungen kommen, die keinen brauchbaren Schalldruckverlauf mehr liefern (siehe Bild 4.4).

Experimente sind nur dann angebracht, wenn ein Meßmikrofon zur Verfügung steht und Sie durch Nahfeldmessungen Informationen über den Schalldruckverlauf sammeln können. (Soviel vorab: Wenn Sie Messungen aus einem Abstand von weniger als $1/10$ des Membranradius machen, können Sie auch bei der Messung tiefer Frequenzen in Ihrem Wohnraum aufs dB genau sehen, was passiert. Sie brauchen also kein teures Meßlabor mit einem reflektionsarmen Raum anzumieten. Mehr dazu in Kapitel 6.)

Ob es nun um die Verbesserung vorhandener Boxen oder um den Boxen-Neubau geht, in jedem Fall beginnt nach den ersten Kalkulationen (benötigter Schalldruck, Grenzfrequenz, Volume Displacement, Membran- und Gehäusegröße) die Praxis. Spätestens jetzt werden einige Korrekturen der berechneten Werte er-

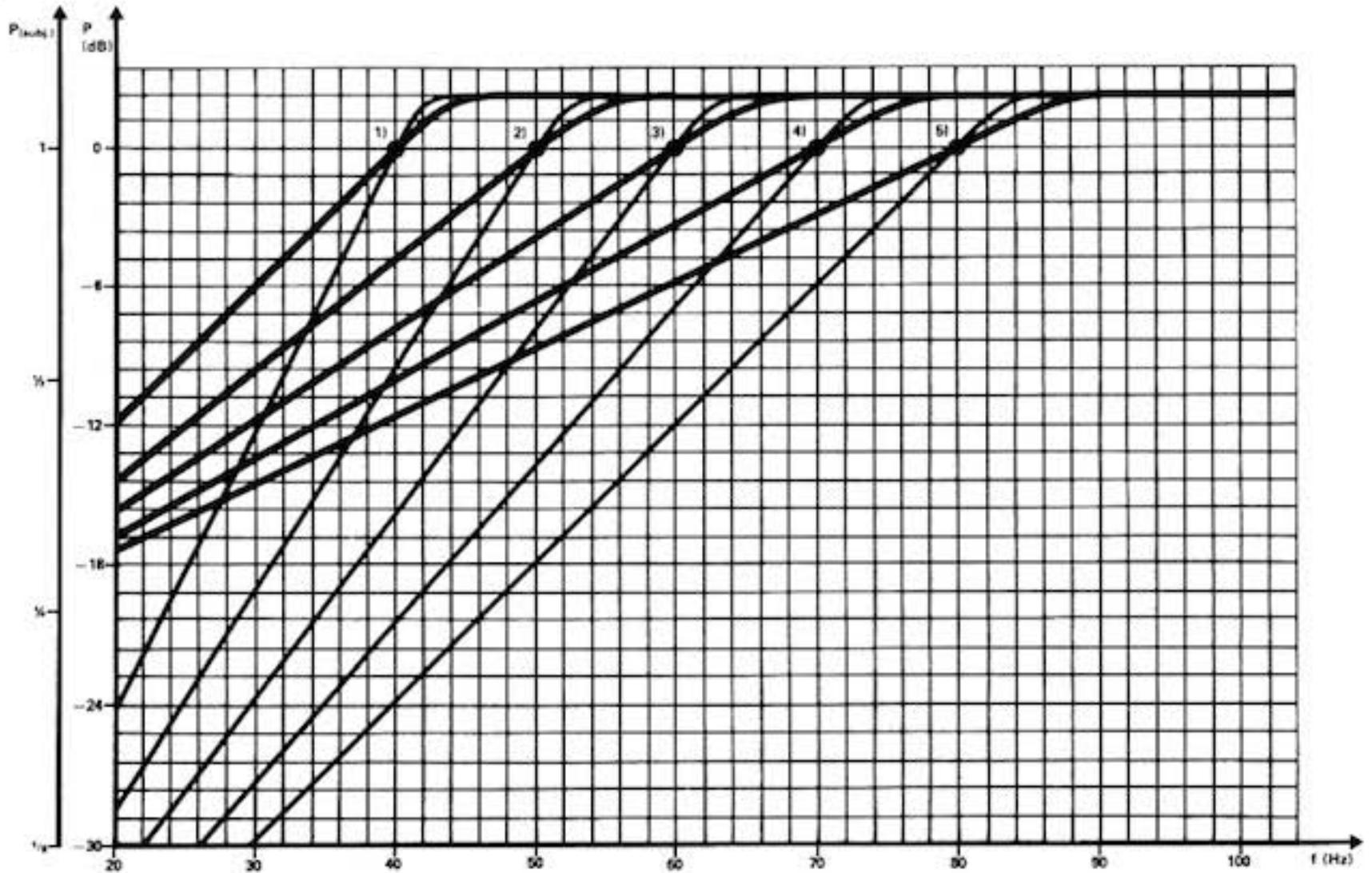
3a

a)



b)

86902-4-3a



86902-4-3b

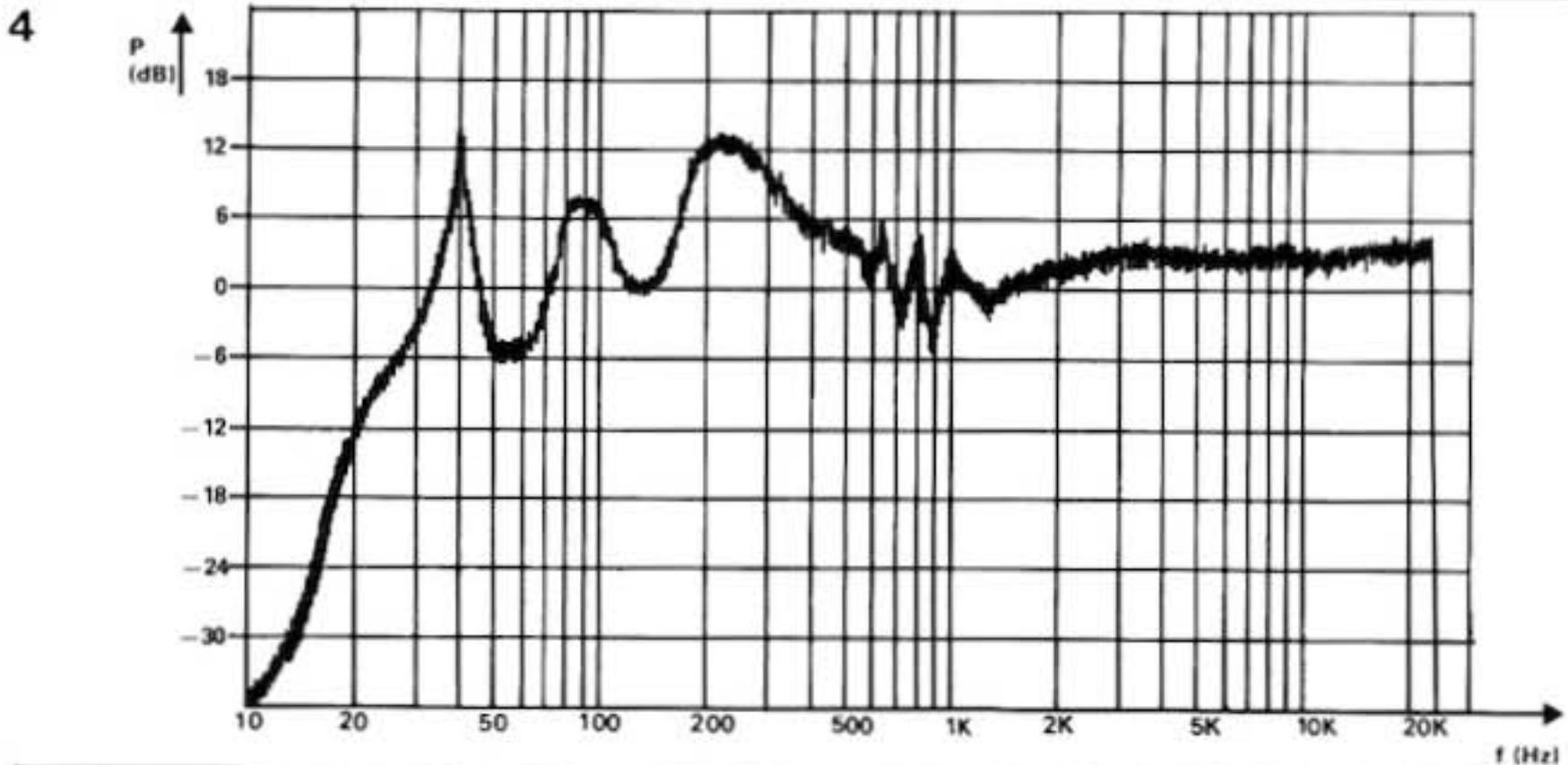


Bild 4.3a. Der Schalldruckverlauf unter der Resonanzfrequenz ist zur Bewertung der Baßwiedergabe einer Lautsprecherbox ebenso wichtig wie die Resonanzfrequenz selbst.

Kurve 1: geschlossene Box (Filter 2ter Ordnung) mit 12 dB/Oktave Steilheit.

Kurve 2: Baßreflexbox (Filter 4ter Ordnung) mit 24 dB/Oktave Steilheit.

Kurve 3: Aktiv entzerrte Baßreflexbox (Filter 6ter Ordnung) mit 36 dB/Oktave Steilheit.

Bild 4.3b. Das Diagramm zeigt die Schalldruckwiedergabe von Lautsprecherboxen 2ter und 4ter Ordnung für verschiedene -3 dB Frequenzen (1 = 40 Hz, 2 = 50 Hz, 3 = 60 Hz usw.). Eine geschlossene Box mit $f_s = 60$ Hz ist z.B. bei 30 Hz gut doppelt so laut wie eine Baßreflexbox mit $f_s = 50$ Hz. Die lineare Skala wurde hier gewählt, weil die Charakteristik des Gehörs bei tiefen Frequenzen eher linear als logarithmisch ist. Die üblichen Frequenzschriebe mit durchgehend logarithmischer Skala verharmlosen oft die Unterschiede zwischen den Boxen.

Bild 4.4. Bei der FehlAbstimmung von Boxen höherer Ordnung kann ein höchst sonderbares Amplituden- und Phasenverhalten auftreten. Auf diese Weise sind viele hervorragende Musikerboxen für Baß und Leadgitarre entstanden, aber keine brauchbaren Hifiboxen.

forderlich. Ursache dafür ist das Dämmmaterial oder die Konstruktion der Lautsprecherchassis, die neben R_{ms} weitere mechanische Reibungswiderstände in die Rechnung einbringen können.

Beim Dämmmaterial wird der Reibungswiderstand über die Reibung der Luftmoleküle in diesem Material erzeugt, wobei es zwischen verschiedenen Materialien deutliche Unterschiede gibt. Bei den Lautsprecherchassis kann eine poröse Staubschutzkalotte (bzw. überhaupt keine, wie bei manchen Koaxialchassis oder Chassis mit Dispersionskegel) oder eine luftdurchlässige Sicke der Membranaufhängung zu erheblichen Reibungswiderständen führen. Das kann dann den berechneten Q_{mc} -Wert von über 10,0 auf Werte unter 5,0 absenken.

Der Einfluß der Reibungswiderstände auf Q_{mc} ist :

$$Q_{mc} = \frac{2\pi \cdot f_c \cdot M_{md}}{R_{ms} + R_x}$$

Je größer die zusätzlichen Reibungswiderstände R_x sind, um so kleiner wird Q_{mc} . Das führt dazu, daß ein Lautsprechergehäuse die Resonanzfrequenz f_s und die Güte Q_{ts} nicht proportional erhöht. Zusätzlich bewirkt der Reibungswiderstand des Dämmmaterials über isothermische Effekte eine akustische Vergrößerung des Gehäusevolumens, da die Schallgeschwindigkeit bis zu 50 % verringert werden kann. Damit stimmt die berechnete Resonanzfrequenz nicht mehr mit der tatsächlichen er-

zielten überein. Es treten also weitere Abweichungen auf.

Schließlich kann noch ein Teil des Dämmmaterials im Gehäuse mit der Membran mitschwingen und deren bewegte Masse erhöhen. Das verändert ebenfalls die Werte von f_c , Q_m und Q_e . Hier hilft nur praktisches Vorgehen. Der Einfluß des Dämmmaterials auf die bewegte Masse kann vermieden werden, wenn man das Material in Form von Matten in das Gehäuse einbringt und diese Matten durch einige lange Nägel in Position gehalten werden. In Position bedeutet hier: bei geschlossenen Boxen gleichmäßig im Gehäuse verteilt. An den Wänden des Gehäuses ist das Material wenig wirksam, da hier für alle Frequenzen ein Schnelleminimum zu finden ist. Ohne Bewegung der Luftmoleküle kann ein Reibungswiderstand wenig bedämpfen.

Der Einfluß des Dämmmaterials auf Q_{mc} (vergrößerte Bedämpfung) kann durch den Standard-Verlustfaktor $Q_l = 5,0$ für geschlossene Boxen vor dem Bau in die Berechnungen einbezogen werden, indem man R'_{dc} weiter erhöht. Das wurde bereits in Kapitel 3 näher besprochen. Bei passiven Boxen darf man in diesem Fall natürlich auch die Widerstände vorgeschalteter Kabel usw. nicht vergessen, auch deren Einfluß wurde bereits in Kapitel 3 untersucht. Dabei zeigte sich, daß sich in vielen Fällen übliche Widerstände in der Zuleitung und übliche Reibungswiderstände durch das Dämmmaterial kompensieren lassen. Es bleibt der Einfluß des Dämmmaterials auf das effektive Volumen der Box. Machen wir es uns so einfach wie möglich. Wir errechnen das benötigte Gehäusevolumen, indem wir entweder Q_l und vorgeschaltete Widerstände direkt in die Berechnung einbeziehen oder indem wir einfach mit dem Widerstand R'_{dc} rechnen:

$$R'_{dc} = R_{dc} \cdot \frac{Q_{es}}{Q_{ts}}$$

Wir reduzieren das berechnete Volumen dann um ca. 10 % (als Vorkompensation). Anschließend überlegen wir uns eine geeignete Form für das Gehäuse und fangen an zu bauen. Dabei ist es zweckmäßig, eine Gehäusewand (Rückwand) abschraubbar zu lassen, denn es muß evtl. das Volumen der Box noch weiter verringert werden. Sobald das Chassis eingebaut und das Dämmmaterial eingefüllt ist, können wir eine Messung von f_c und Q_{mc} vornehmen.

Die Messung zeigt meistens, daß noch geeignete Korrekturmaßnahmen nötig sind. Dazu sind zwei Berechnungen erforderlich:

a) es ist der Reibungseinfluß zu ermitteln und b) es ist die scheinbare Volumenänderung festzustellen.

Für die Volumenänderung ist die errechnete Resonanzfrequenz f_c und die gemessene f'_c wichtig. Es gilt folgende Beziehung:

$$V_{\text{box (eff)}} = \frac{V_{as}}{\frac{f_c'^2}{f_s^2} - 1}$$

Der Korrekturfaktor ergibt sich nun aus dem Quotienten V_{box} und $V_{\text{box(eff)}}$. Das Volumen der tatsächlichen Box wird gegenüber dem berechneten Volumen um diesen Faktor größer. Wer auf diese Korrektur verzichtet, kann das Gehäuse auch um diesen Faktor kleiner machen. Ob weitere Korrekturfaktoren nötig werden, bestimmt das Verhältnis von Reibungswiderständen und vorgeschalteten elektrischen Widerständen. Wie bereits erwähnt, sind die Ergebnisse nur dann exakt, wenn sowohl R_{dc} wie auch die Reibungswiderstände (bzw. Q_{mc}) korrekt berücksichtigt werden. Nur der Beiwert für den Reibungswiderstand im Dämmmaterial ist bei den ersten Berechnungen noch nicht genau bekannt.

Alle Widerstände, die in die Zuleitung des Chassis gelegt werden, verringern die Bremswirkung der elektrischen Seite. Wenn Q'_{tc} durch das Dämmmaterial unter den errechneten Wert sinkt, was bedeutet, daß f'_c zu Q'_{tc} größer als f_s zu Q_{ts} ist, so gibt es einen Widerstand R_x , mit dem Q'_{tc} wieder den richtigen höheren Wert aufweist. Da vor Lautsprecherchassis in passiven Boxen immer Kabel und Frequenzweichen angebracht sind, ist mit Widerständen zu rechnen (bzw. haben wir bereits mit Widerständen gerechnet). Die dürfen wir jetzt vergrößern, also preiswertere Spulen und Zuleitungskabel mit höherem Innenwiderstand einsetzen. Dadurch erhöhen wir Q'_{tc} auf den berechneten Wert, während f'_c konstant bleibt. Widerstände in der Zuleitung zum Chassis sind kein Fehler, wenn sie in der Rechnung berücksichtigt werden. Sie verringern nur den Wirkungsgrad der Box.

Der andere Weg erhöht die Resonanzfrequenz, während der Wirkungsgrad unverändert bleibt. Wird das Gehäuse weiter verkleinert, also über den ersten Korrekturfak-

tor hinaus, so ist der Wert für Q'_{tc} ebenfalls mit dem vorgeschriebenen Wert aus der Tabelle in Einklang zu bringen. Da f'_c zu Q'_{tc} aber größer als f_s zu Q_{ts} war, wird jetzt f'_c über dem berechneten Wert für f_c liegen. Es ist dabei völlig egal, ob wir mit Korrekturfaktoren rechnen, und dann anschließend weniger am Gehäuse ändern, oder ohne die Korrekturfaktoren rechnen, dafür etwas mehr am Gehäusevolumen oder den vorgeschalteten Widerständen ändern. Das kann jeder so machen, wie er will. Als besserer Rechner hat man weniger Ärger mit dem Handwerklichen oder umgekehrt. An der Reihenfolge rechnen, bauen, messen, kommt man beim Bau von Lautsprecherboxen nicht herum. Keine Angst vor den Messungen, sie sind so simpel, daß jeder in kürzester Zeit zu den richtigen Informationen kommt (näheres in Kapitel 6). Hier heißt es Q'_{tc} messen und gegebenenfalls durch elektrische bzw. mechanische Widerstände oder über das Gehäusevolumen auf den vorgegebenen Wert bringen. Fehler die kleiner als 5 % sind, sind ein Grund zufrieden mit der Arbeit aufzuhören. Bessere Werte lohnen die Mühe nicht, denn ab hier entscheidet die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck über die Konstanz der Werte.

Also:

1. Berechnen der gewünschten Box nach der Vorgabe für Q_{tc} aus der Tabelle, egal ob mit oder ohne Korrektur für externe Widerstände, aber immer mit Korrektur für R_{ms} des Chassis.

2. Gehäusevolumen um 10 % kleiner wählen als berechnet, und passende Gehäuseform suchen (Erinnerung Kapitel Raumakustik, Raumresonanzen).

3. Box aufbauen, bedämpfen, einen Widerstand der Größe von Kabel- und Frequenzweichenbauteilen vorschalten (Kapitel 6 über Verstärkerinnenwiderstände lesen), dann Q'_{tc} und f'_c messen (ggf. Frequenzgenerator und Millivoltmeter leihen).

4. Meßwerte interpretieren:

a. Die gemessene Resonanzfrequenz f'_c entspricht der berechneten Frequenz f_c . Desgleichen ist $Q'_{tc} = Q_{tc}$. Volltreffer!

b. Die gemessene Resonanzfrequenz f'_c liegt über dem berechneten Wert, aber Q'_{tc} ist gleich Q_{tc} . Ab jetzt mit der neuen Resonanz-

frequenz weiterrechnen.

c. Die gemessene Resonanzfrequenz f'_c entspricht der berechneten Frequenz f_c . Aber Q'_{tc} liegt unter dem vorgegebenen Q_{tc} . Jetzt muß entweder das Netto-Gehäusevolumen kleiner oder ein größerer Widerstand vorgeschaltet werden.

Für die Verringerung des Netto-Gehäusevolumens gilt die Formel:

$$V_{\text{box (neu)}} = \frac{V_{\text{box (alt)}}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}}\right)^2}$$

Das liefert in den meisten Fällen ausreichend genaue Ergebnisse.

Wenn nicht, Dämmmaterial etwas verringern bzw. etwas mehr Dämmmaterial nehmen. Die neue Resonanzfrequenz f'_c und die neue -3 dB Frequenz messen und mit diesen Werten die externen Bauteile aus der Tabelle bestimmen (soweit vorhanden).

Eine Vergrößerung der vorgeschalteten Widerstände berechnet sich nach der Formel:

$$R''_{dc \text{ (neu)}} = R'_{dc \text{ (alt)}} \cdot 1 + \frac{\frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}} - 1}{\frac{Q_{tc}}{Q_{mc}}}$$

Wenn wir den Einfluß verschiedener Widerstände berechnen wollen, so geht das auch über die normierten Werte von L und C. Wir berechnen diese Werte aus bewegter Masse und f_c , wobei wir den Wert von R um den zu untersuchenden Widerstand erhöhen. (vgl. Kapitel 3, auch das ist für Besitzer von Kleincomputern sicher ein interessantes Gebiet).

$$Q_{tc} = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

d. Die Resonanzfrequenz f'_c entspricht der berechneten Frequenz für f_c . Aber Q'_{tc} liegt über Q_{tc} . Das ist sehr selten, aber es kann vorkommen. In diesem Fall muß das Gehäuse vergrößert werden, zum Beispiel durch einen Sockel. Geht das nicht, muß entweder der Reibungswiderstand vergrößert oder der elektrische Widerstand vor dem Chassis verkleinert werden. Für die Vergrößerung des Gehäuses gilt:

$$V_{\text{box (neu)}} = V_{\text{box (alt)}} \cdot \left(\frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}}\right)^2$$

Kritisch wird es bei der Vergrößerung der Reibungswiderstände im Gehäuse. Hier kann es vorkommen, daß die Meßwerte stimmen, der Klang aber nicht mehr. Es ist oft zu hören, daß ein Lautsprechergehäuse überbedämpft ist. Die Box klingt wenig lebendig und irgendwie unnatürlich. Auch hierfür liefert das Kapitel 1 über Raumakustik eine Erklärung. Zu wenige Resonanzen sind genauso falsch wie eine ungünstige Verteilung der Resonanzen. Das gilt ebenso für Hörräume wie auch für Lautsprechergehäuse.

e. Die gemessene Resonanzfrequenz f'_c und Q'_{tc} liegen zu niedrig. Das Gehäusevolumen verringern, bis f'_c oder Q'_{tc} (oder beide) den richtigen Wert aufweisen. Anschließend siehe a..d.

Eine weitere Möglichkeit, den Q_{tc} -Wert zu modifizieren wäre eine gleichzeitige Änderung von L und C, also der Nachgiebigkeit C_{ms} und der bewegten Masse M_{md} . Für Q_{tc} gilt ja:

$$Q_{tc} = \frac{M_{md}}{C_{ms} \cdot (Bl)^2}$$

Dadurch ändert sich Q_{tc} , ohne daß die Resonanzfrequenz verändert wird. Das nur der Vollständigkeit halber.

Jetzt können sie weiterarbeiten. Um das Volumen Ihrer Box anzupassen, bekleben Sie die Gehäusewände mit stabilisierenden Platten, bis das berechnete Volumen erreicht ist. Aus diesem Grund sollte auch die Rückwand abnehmbar bleiben, es arbeitet sich dann einfacher. Wenn alles stimmt, muß auch die Rückwand eingeleimt werden. Zum Bekleben der Wände eignen sich besonders gut Bitumenplatten, die sich auch einfach herstellen lassen. Dazu trägt man die Bitumenmasse (aus dem Baumarkt) in einer guten zentimeterdicken Lage auf alte Teppichfliesen auf. Anschließend muß alles gut trocknen (sonst lösen die Lösungsmittel noch die Klebeverbindungen an dem Chassis auf). Mit Hilfe dieser Maßnahme sollte f_c und Q_{tc} in der Nähe der gewünschten Werte gebracht werden können. Wie gesagt, Toleranzen von 5 % nach oben und unten sind unkritisch. Sie sehen, es kann etwas kompliziert werden. Bei einer geschlos-

senen Box 2ter Ordnung ist der Aufwand meist geringer, denn Abweichungen von Q_{tc} sind nicht so ernst zu nehmen. Bei Boxen höherer Ordnung ist es jedoch wichtig, daß f_c und Q_{tc} die richtigen Werte aufweisen, damit die Übertragungsfunktion mit dem vorgeschalteten Filter übereinstimmt. In allen Fällen sollte Q_{tc} den richtigen Wert haben. Um die restlichen Bestandteile des Filters zu bestimmen, rechnet man dann mit der gefundenen Resonanzfrequenz weiter.

Einige Worte zum Dämmmaterial.

Es ist sinnvoll, wenn man zu Matten verarbeitetes Dämmmaterial zur Bedämpfung einsetzt, das eine ausreichende innere Festigkeit hat. Gute Eigenschaften hat Steinwolle oder Mineralwolle. Ebenfalls sehr empfehlenswert ist ein Kunstfaservlies, das als B.A.F (Bonded Acetat Fibre) verkauft wird. Dieses Material ist verarbeitungsfreundlicher als Steinwolle oder Mineralwolle und hat sehr gute Dämpfungseigenschaften. Bei Platten aus Schaumstoff (meist Polyurethan) ist die Wirkung oft sehr hoch, so daß nicht das gesamte Gehäuse damit gefüllt werden darf. Hier sollte das Material in der Mitte des Gehäuses angebracht werden, um optimal zu wirken (Schnelleximum). Die Rückseite des Chassis sollte nicht durch Schaumstoffplatten vom Gehäusevolumen abgetrennt werden, es sei denn, wir benötigen extrem hohe Reibungswiderstände zur Bedämpfung des Chassis.

Neben diesen verschiedenen Materialien zur Bedämpfung der Lautsprechergehäuse wird oft langfaserige Naturwolle empfohlen. Diese verfügt über hervorragende Dämpfungseigenschaften, ist dabei aber auch recht teuer. Dieses Material ist dafür bekannt, daß es mit der Membran mitschwingt und so die bewegte Masse bei tiefen Frequenzen vergrößert (das ist ein alter Trick einiger Konstrukteure, mit dem die Baßwiedergabe von Transmission-Line Boxen verbessert werden kann). In geschlossenen Boxen sollte die Wolle mit anderen Dämmstoffen besserer innerer Festigkeit kombiniert werden. Noch kurz einige Worte zu anderen Abstimmungsmöglichkeiten für eine geschlossene Box 2ter Ordnung. Wenn Sie eine Box auf Werte über $Q_{tc} = 0,707$ abstimmen, tritt eine Schalldrucküberhöhung auf, die etwas über der Resonanzfrequenz liegt. Dieser Effekt wird von manchen Herstellern bewußt genutzt, um die Baßwiedergabe kleiner Boxen etwas aufzubessern. Die Überhö-

hung errechnet sich nach der Formel:

$$P_{\text{peak}} = 20 \log Q_t$$

Dabei ist die Frequenz:

$$f_{\text{peak}} = \frac{f_c}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot Q_{tc}^2}}}$$

Dieser Effekt kann natürlich auch genutzt werden, um einer Box einen bestimmten Eigenklang zu verpassen, z.B. für Musiker. Aber Vorsicht mit der Membranauslenkung.

Das gilt auch alles für den Einbau von Mitteltonchassis. Dabei sollte man eine Abstimmung auf $0,5 < Q_{tc} < 1,0$ anstreben. Festgelegt sind Sie hier nur bei dem Hochpaß 4ter Ordnung, da die Tabelle den Wert für Q_{tc} festlegt. Die Resonanzfrequenz sollte weit unter der Einsatzfrequenz liegen, um die Übertra-

gungsfunktion der Frequenzweiche nicht zu sehr zu beeinflussen. Außerdem muß das Gehäuse ausreichend stabil sein. Einige Beispiele sind in Bild 4.5 gezeigt.

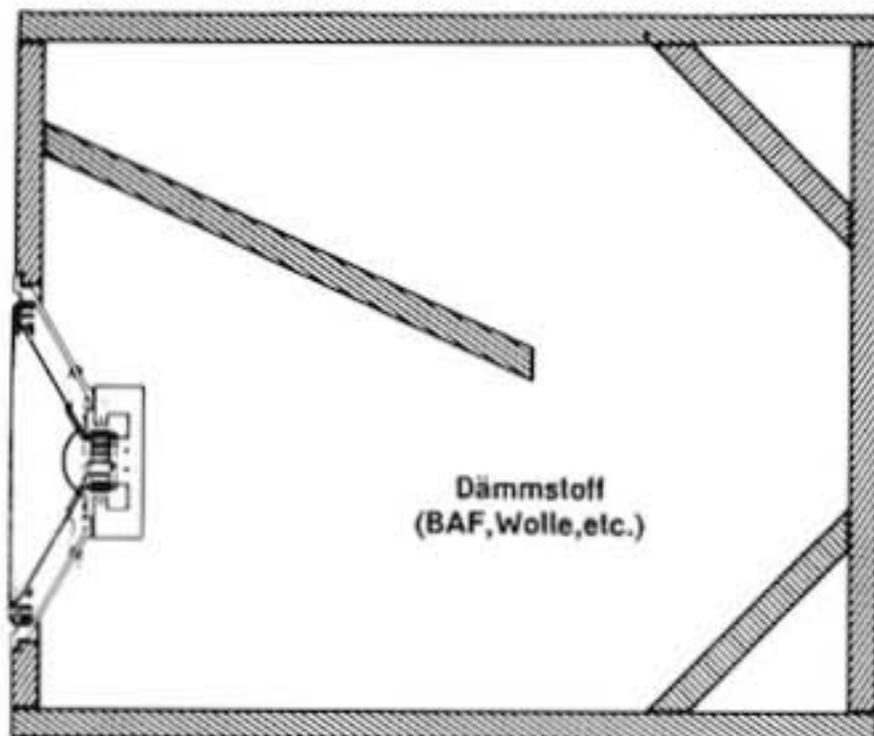
Bei einigen Chassis führt der Gehäuseeinbau zu Q_{tc} -Werten über 1,0. Hier hat der Hersteller an Magnetmaterial gespart, so daß der Gehäusebau zu einigen Experimenten führt. (Im Mitteltonbereich verpassen Sie solchen Chassis eine Schallwand statt eines Gehäuses und die Sache ist erledigt.) Bei Tiefton-Chassis müssen Sie den Magneten etwas unterstützen. Das läßt sich auf zweierlei Art realisieren: einmal elektronisch, zum anderen über die Reibungswiderstände. Allerdings reichen hier-

Bild 4.5. Verschiedene Boxenformen.

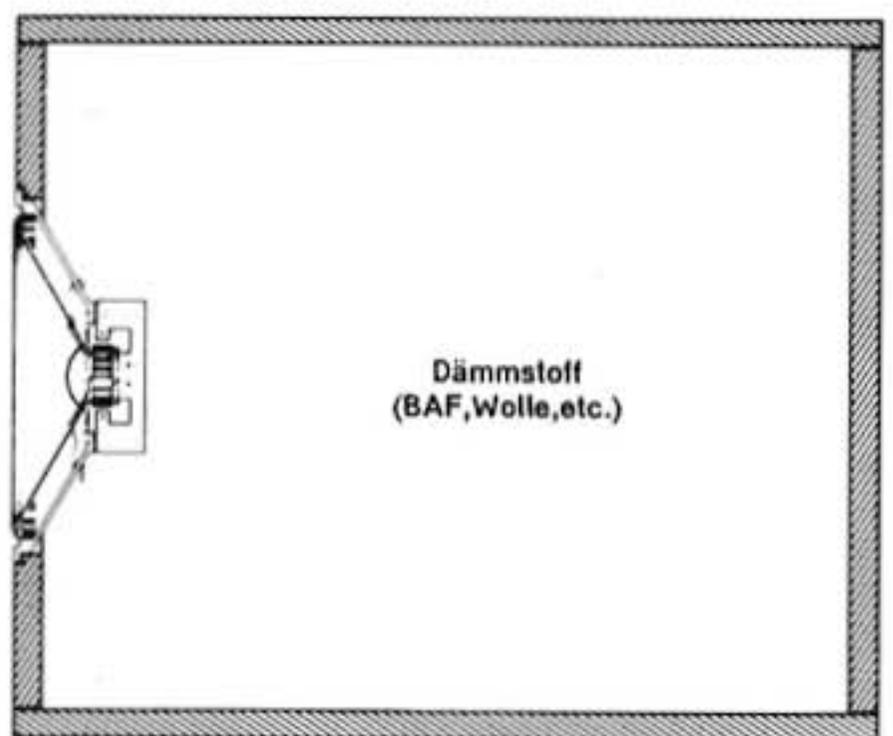
a) Einfach und gut.

b) Weniger einfach, weil die richtigen Proportionen nur mit größerem Rechenaufwand zu ermitteln sind.

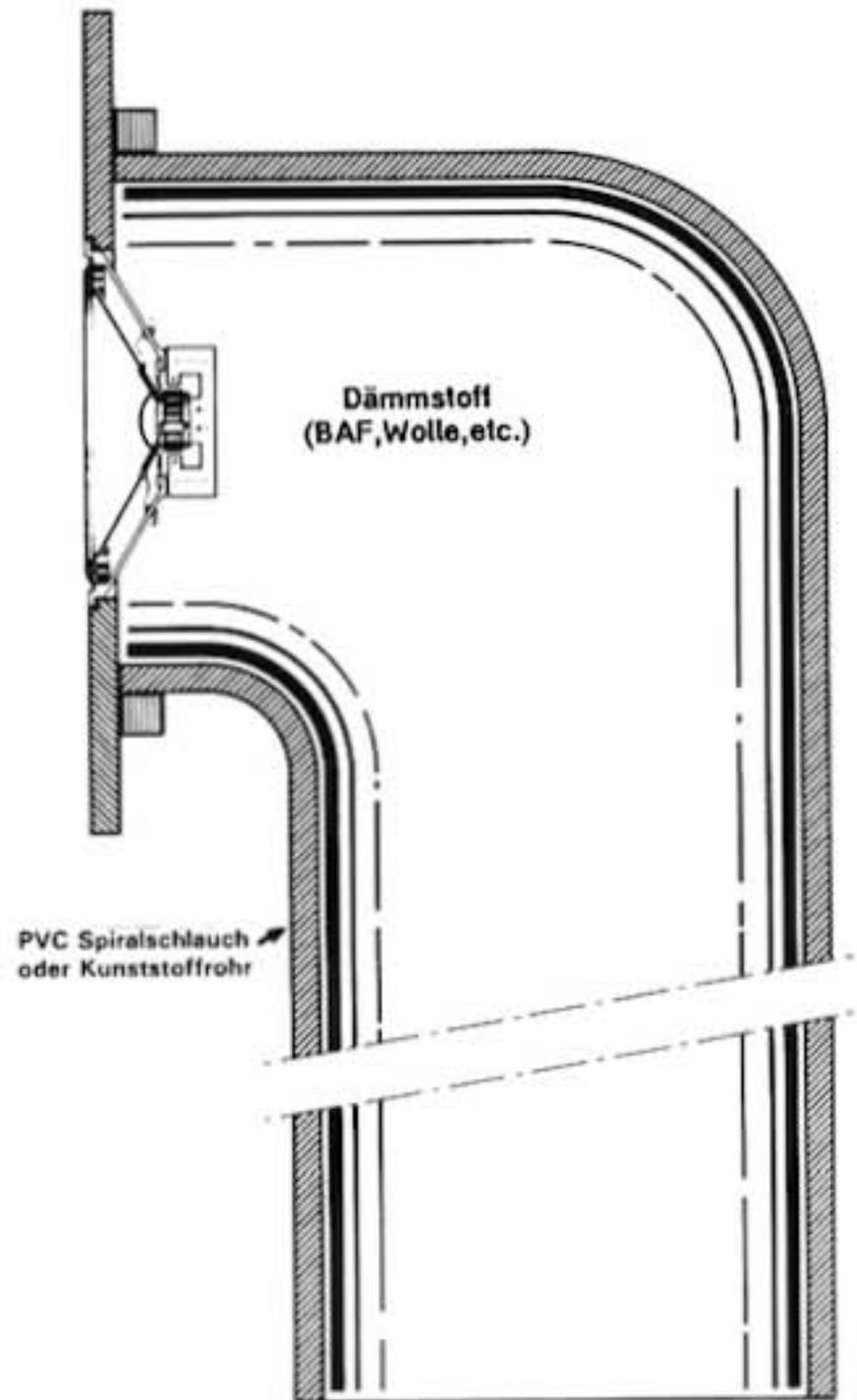
5a



b

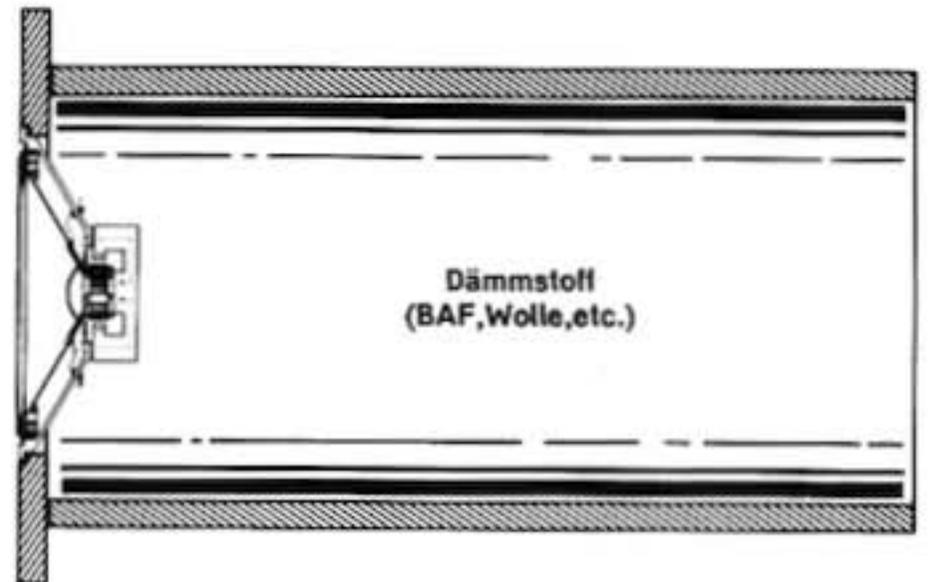


5c (Fortsetzung)

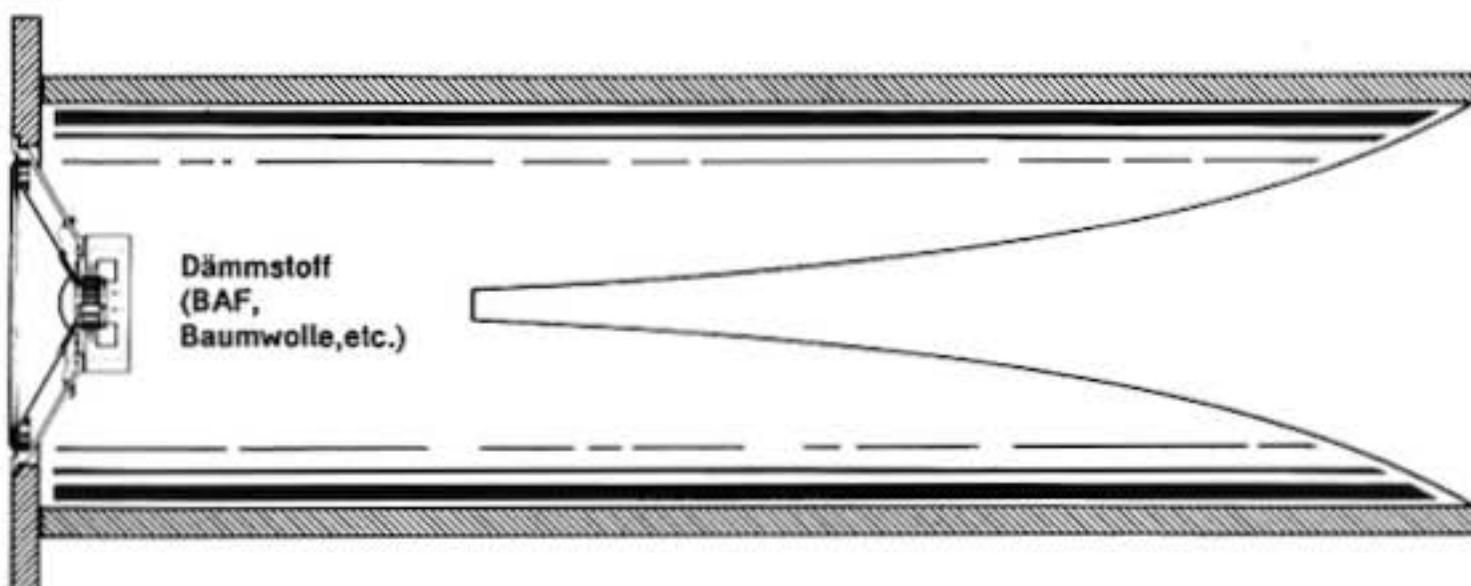


- c) Sehr gut, erfordert aber viel Platz.
- d) Vorsicht bei kurzen und offenen Rohren; es können starke Resonanzen auftreten.
- e) Eine exponentielle Öffnung verringert die Resonanzeffekte offener Rohre, verursacht dafür aber Probleme beim Einbau.

d



e

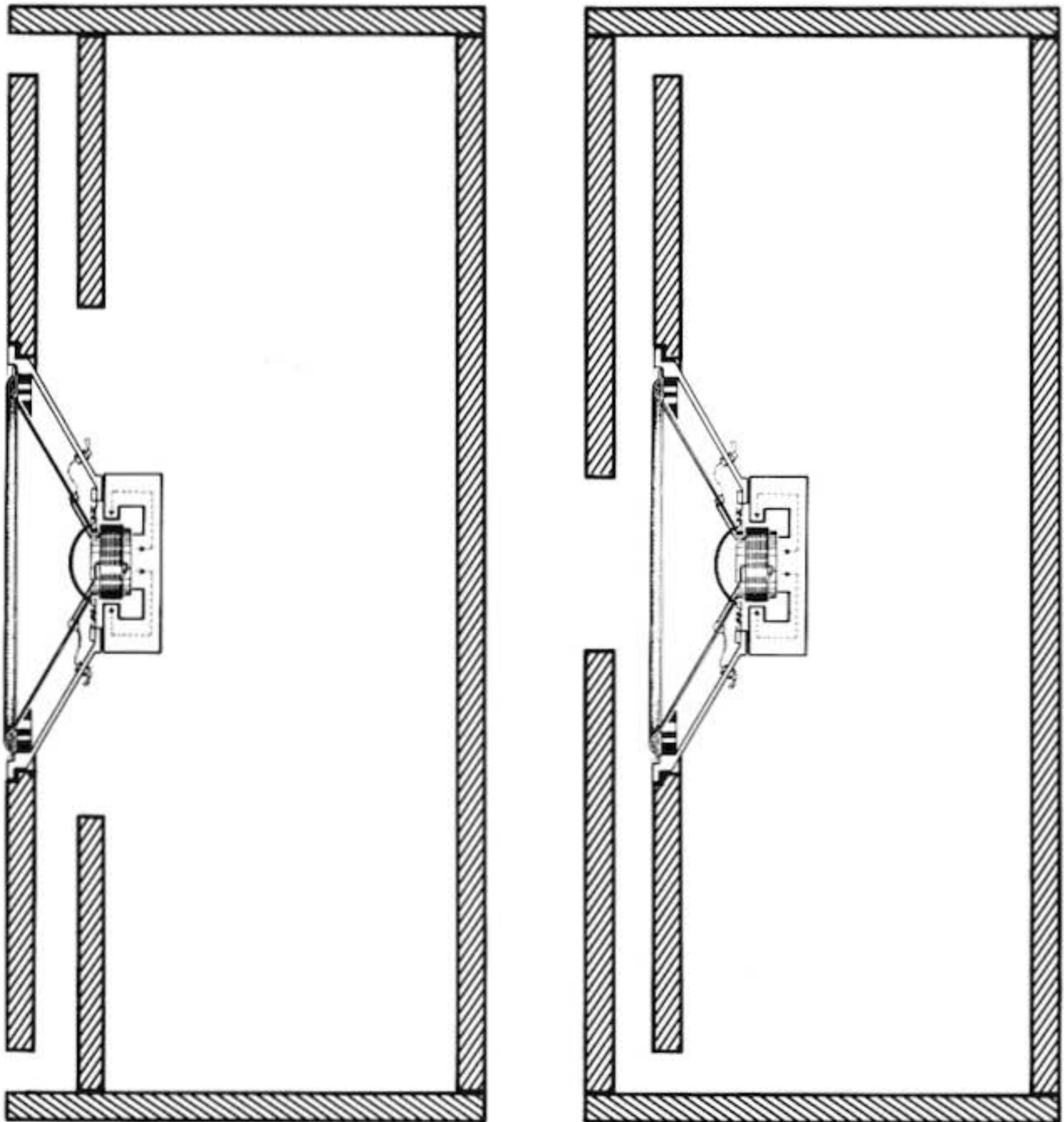


zu die Reibungskräfte im Dämmmaterial nicht aus, es müssen wirksamere Wege gefunden werden. Strömungswiderstände in Form von Löchern oder Schlitzen in der Gehäusewand erfüllen diesen Zweck ebenso wie schmale Tunnel. Zwei Beispiele hierfür zeigt das Bild 4.6.

(Diese alte Idee wird heute vielfach als neuer-

Bild 4.6. Diese Gehäusebauformen nutzen den Widerstand der Luft (Reibung und Masseträgheit) zur Bedämpfung der Membranbewegung. (Die Gehäuseform geht auf einen Vorschlag von W. Josef und F. Robbins aus dem Jahre 1952 zurück; damals als J-R-Gehäuse bekannt geworden.)

6



86902-4-6

fundener TL-Resonator gepriesen. Lassen Sie sich davon nicht beeindrucken und auch nicht beirren.)

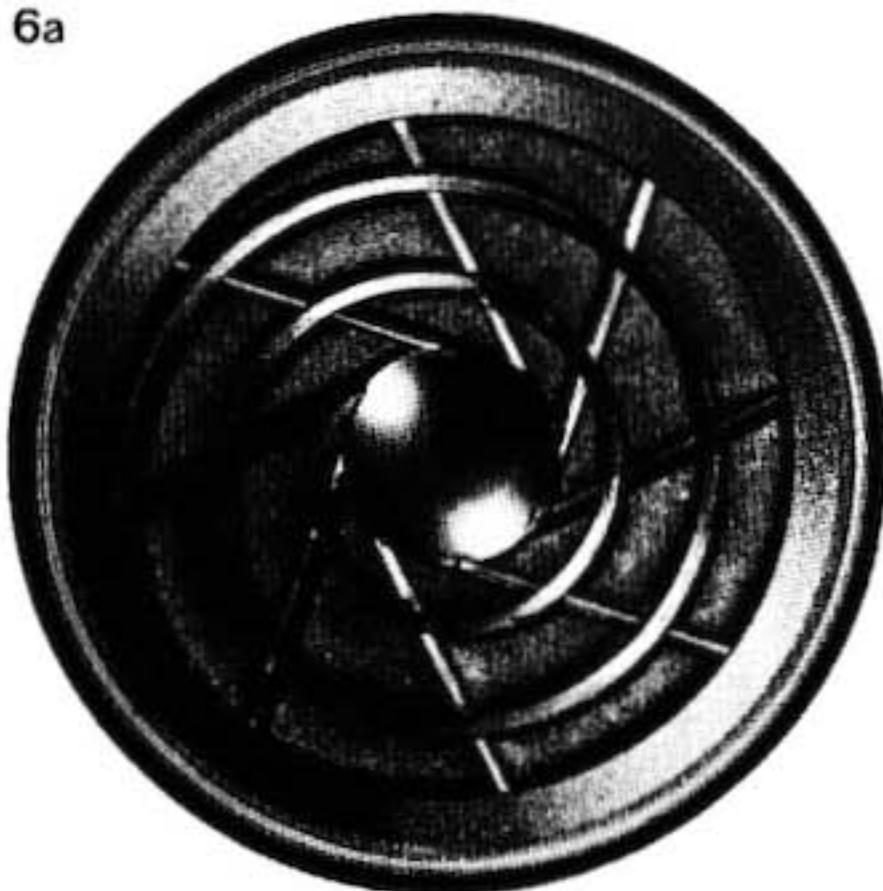
Der einfachste Weg ist der Einsatz von Variovents (Bild 4.6a), sie können zerlegt und mit verschiedenem Dämmmaterial gefüllt werden. So ist der Strömungswiderstand recht gut einstellbar, zumal der Variovent noch in verschiedenen Stufen gerastet werden kann. Mit einem solchen Variovent können Sie natürlich auch den Q_{tc} -Wert von Mitteltonchassis ändern, falls in der Berechnung oder nach dem Bau eines Gehäuses etwas nicht stimmt (auf die elektronischen Lösungen kommen wir noch). Auch in diesem Fall sind natürlich einige Messungen unerlässlich.

Noch ein allgemeiner Hinweis zu allen geschlossenen Boxen. Es wird oft behauptet, daß das sehr lineare Verhalten der Luft große lineare (verzerrungsfreie) Membranauslenkungen ermöglicht. Das gilt natürlich nur, wenn der Antrieb des Chassis ebenfalls sehr linear arbeitet. Das ist lange nicht bei allen Chassis der Fall, auch wenn sie als Langhubchassis im Handel sind. Manche Hersteller geben freundlicherweise X_{lin} und X_{max} an, das zeugt von Ehrlichkeit. Andere Hersteller begügen sich mit X_{max} oder verschweigen einfach alles; hier heißt es aufpassen. Bei vielen Chassis ist man daher oft besser bedient, wenn sie ein Baßreflexgehäuse erhalten.

Compound-Gehäuse

Diese kleine Abwandlung der geschlossenen

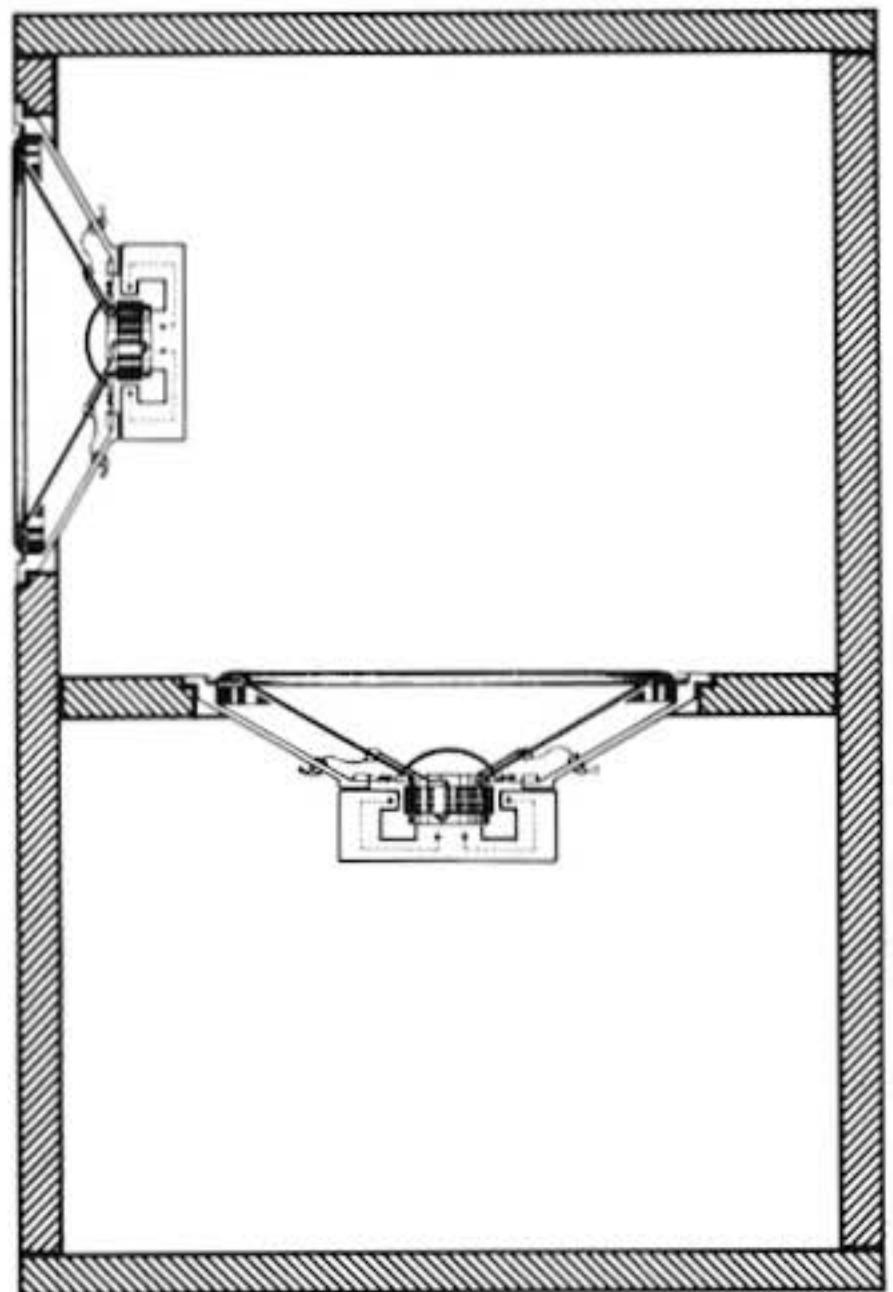
6a



Box genießt in der Szene einen sehr guten Ruf. Der Vorteil der Compound-Anordnung soll eine ungewöhnlich tiefe und saubere Baßwiedergabe sein.

Bei den Beschreibungen des Prinzips geht es in der einschlägigen Literatur ein wenig durcheinander. In jedem Fall erhöht sich die bewegte Masse. Da beide Membranen auf ein Luftvolumen arbeiten, verringert sich die Resonanzfrequenz. (Nur sollte man bei den Berechnungen die Federsteife der zweiten Membranaufhängung nicht wieder vergessen.) Die Luft zwischen den Chassis ist eine akustische Kapazität (im Sinne von nachgiebig), die höhere Frequenzen absorbiert. Eine korrekte Abstimmung auf den Q_{tc} -Wert von

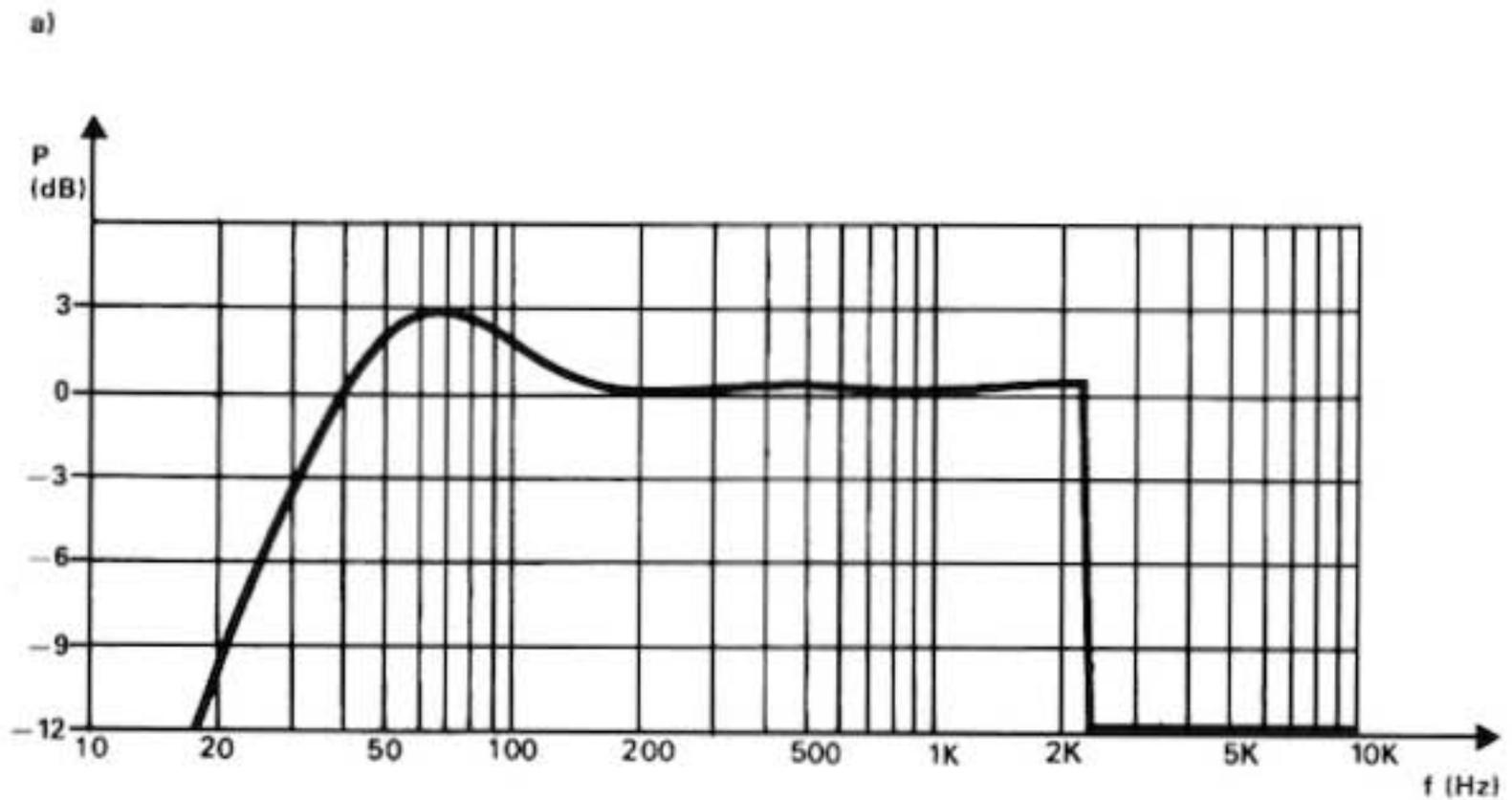
7



86902-4-7

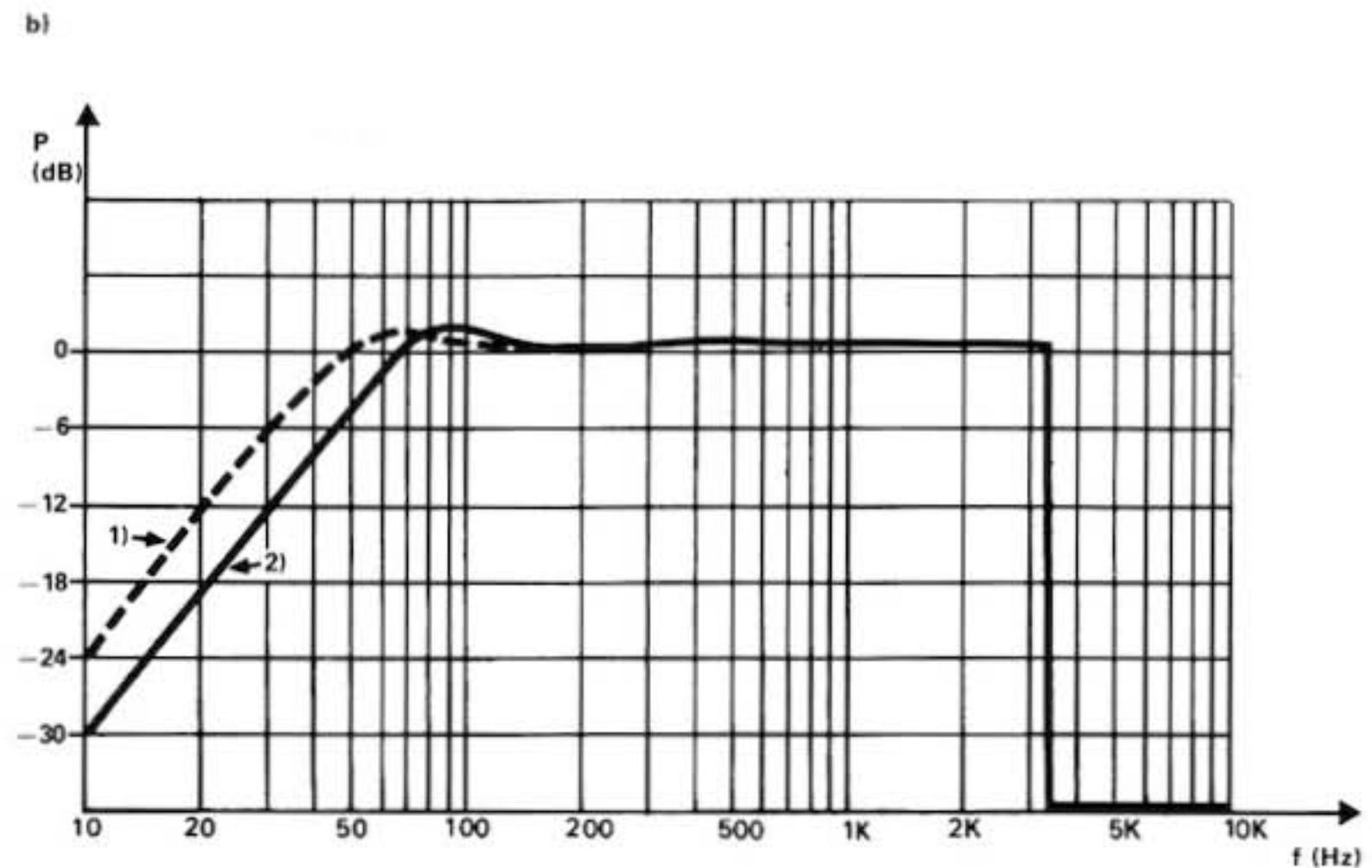
Bild 4.7. Das Compound-Prinzip, auch unter der Bezeichnung Isobarik (Gleichdruck) von der engl. Firma Linn bekannt gemacht. Bei dieser Anordnung ist nur eines von zwei angetriebenen Chassis sichtbar.

8a



86902-4-8a

b

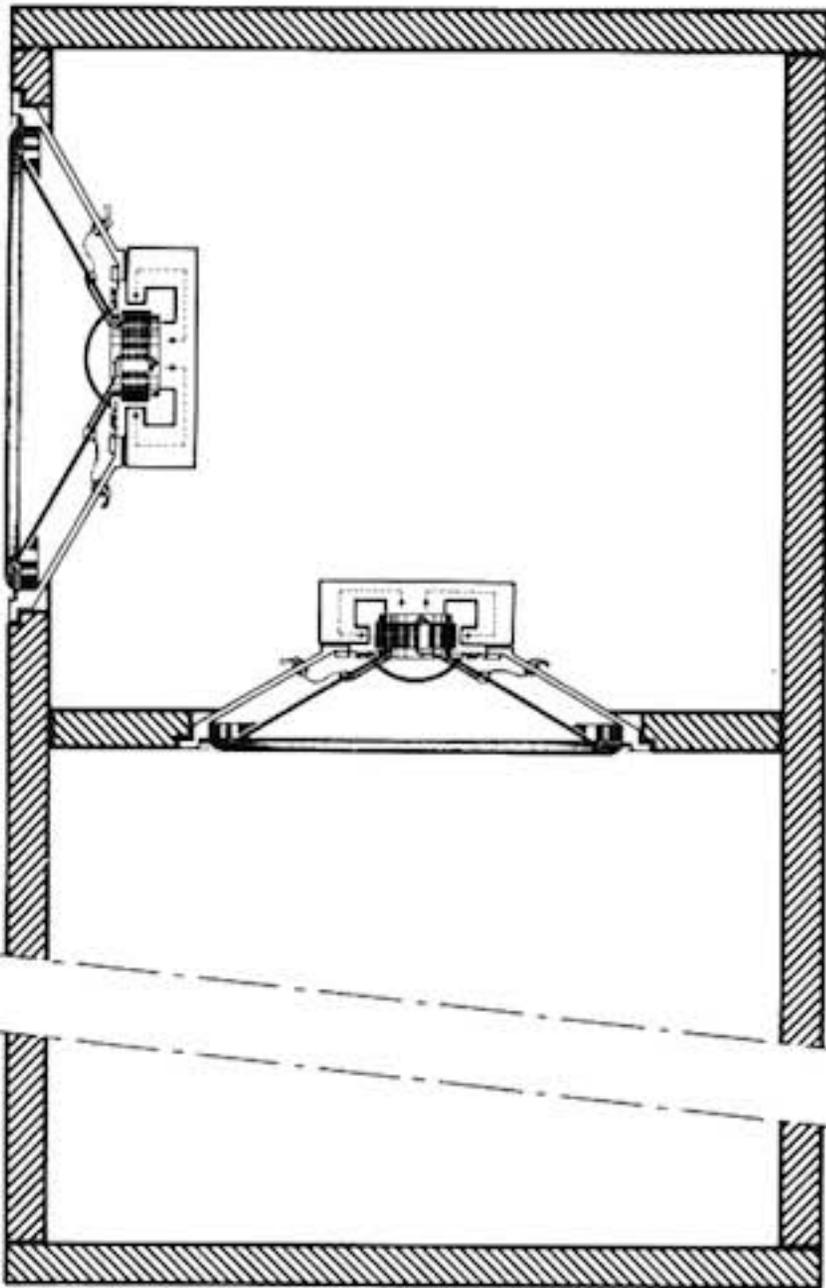


86902-4-8b

Bild 4.8a. Da die Luft zwischen beiden Chassis höhere Frequenzen absorbiert, kann es trotz einer Abstimmung auf den Q_{tc} -Wert von 0,70 zu einer Schalldrucküberhöhung im Bereich der Resonanzfrequenz kommen.

Bild 4.8b. Bei richtiger Abstimmung ist im Tieftonbereich ein Gewinn von 6 dB zu erwarten, ohne das Gehäuse zu vergrößern.
 1) optimale Compound-Abstimmung
 2) Nur ein Chassis im gleichen Größenvolumen

9a



86902-4-9a

0,707 wie bei geschlossenen Boxen üblich, hätte einen Schalldruckverlauf wie in Bild 4.8b zur Folge.

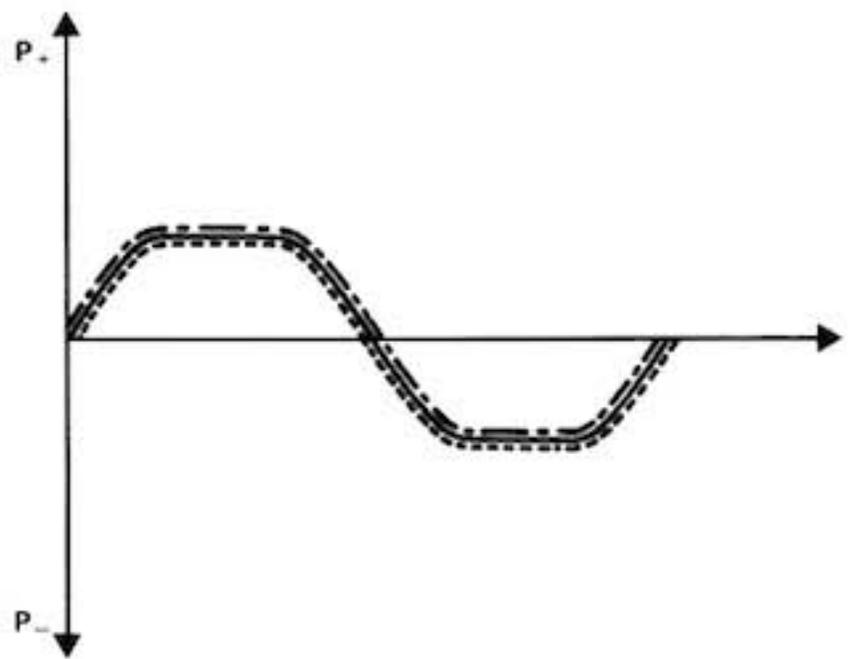
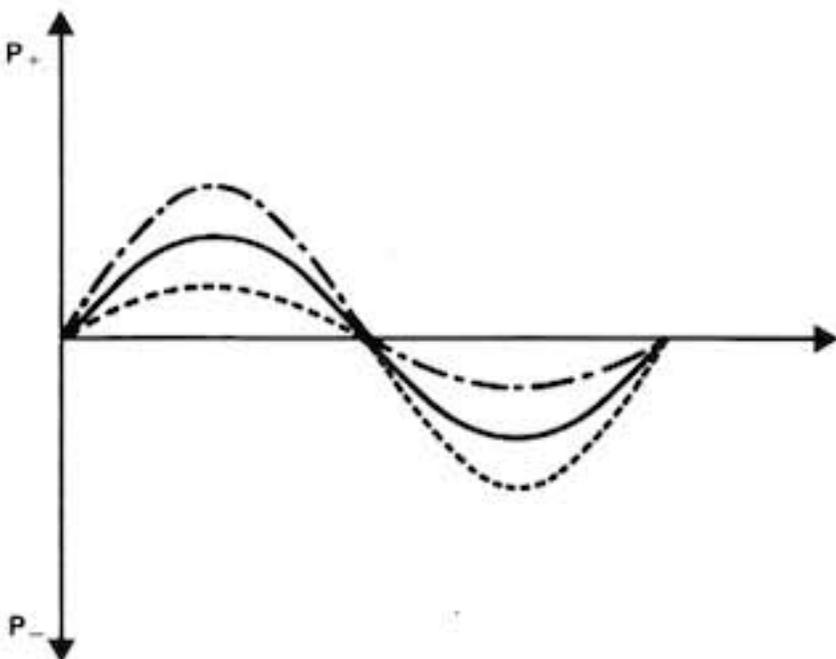
Oft sind die Chassis auch wie in Bild 4.9a angeordnet. Die Erklärung hierfür lautet, daß das Push-Pull-Prinzip die Nichtlinearitäten der Membranaufhängung beider Chassis kompensiert. Ein gutes Chassis sollte nur die Nichtlinearitäten aufweisen, die im Bereich maximaler Auslenkung unvermeidbar sind. Die aber sind symmetrisch (2te Harmonische), so daß die Anordnung der Chassis auch nichts daran ändern kann.

(Die Push-Pull-Anordnung wurde bei einem aktiven Konzept notwendig, da die Verände-

Bild 4.9a. Die Push-Pull Anordnung kann zwar Verzerrungen vom Typ k_2 (1. Harmonische) verringern, aber gegen die bei schlechten Chassis ebenfalls recht ausgeprägten Verzerrungen vom Typ k_3 (2. Harmonische) ist diese Anordnung völlig wirkungslos.

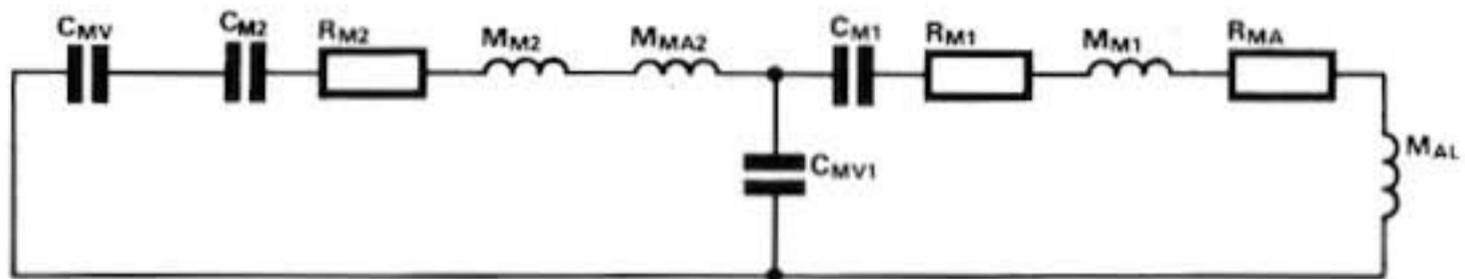
Bild 4.9b. Das linke Kurvenbild zeigt eine Verzerrung vom Typ k_2 . Die strickpunktete Kurve gehört zu Chassis 1, die gepunktete zu Chassis 2. Das Ausgangssignal beider Chassis ist die durchgezogene Kurve. Das gilt auch für das rechte Kurvenbild, nur daß hier eine Verzerrung vom Typ k_3 dargestellt ist.

b

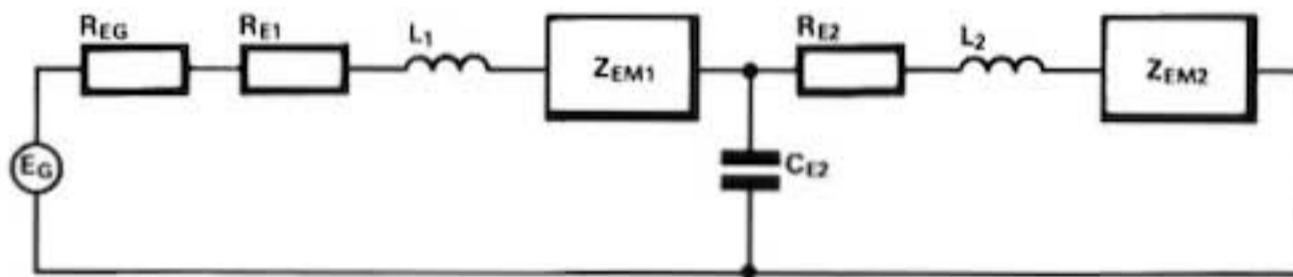


86902-4-9b

mechanisch



elektrisch



86902-4-10

Bild 4.10. Das Ersatzschaltbild der Compound Box (nach Olson).

Die einzelnen Bezeichnungen haben folgende Bedeutung:

- C_{MV} = Nachgiebigkeit der Luft im Gehäuse hinter dem inneren Chassis
- C_{M2} = Nachgiebigkeit der Membranaufhängung des inneren Chassis
- R_{M2} = Reibung im inneren Chassis
- M_{M2} und M_{MA2} = Bewegte Masse und Air Load des inneren Chassis
- C_{MV1} = Nachgiebigkeit der Luft zwischen den Chassis
- C_{M1} , R_{M1} , M_{M1} , M_{AL} = Parameter des sichtbaren Chassis
- E_G = Generatorspannung
- R_{EG} = Innenwiderstand des Generators
- L_1 = Induktivität der Schwingspule des inneren Chassis
- R_{E1} = DC-Widerstand des inneren Chassis
- Z_{EM1} = Motional Impedance des inneren Chassis
- C_{E2} = Nachgiebigkeit des Luftvolumens zwischen den Chassis (verringert die Wirkung des inneren Chassis mit zunehmender Frequenz)

R_{E2} , L_2 , Z_{EM2} = Parameter des sichtbaren Chassis

R_{MA} = Strahlungswiderstand der sichtbaren Membran

rung der Induktivität der Schwingspule beim Ein- und Austauschen im Luftspalt die angeschlossene Elektronik irritierte. Abhilfe brachten zwei Chassis in Push-Pull-Anordnung. Seitdem hat sich die Anordnung etwas verselbstständigt. (Das ist natürlich bei weniger guten Chassis mit hohem Verzerrungsanteil der 1ten Harmonischen auch kein Fehler.) Es wird in den Beschreibungen auch nie ganz klar, ob das Chassis in der Box kleiner als das andere sein muß oder nicht.

Das Ersatzschaltbild einer Compoundbox ist in Bild 4.10 dargestellt.

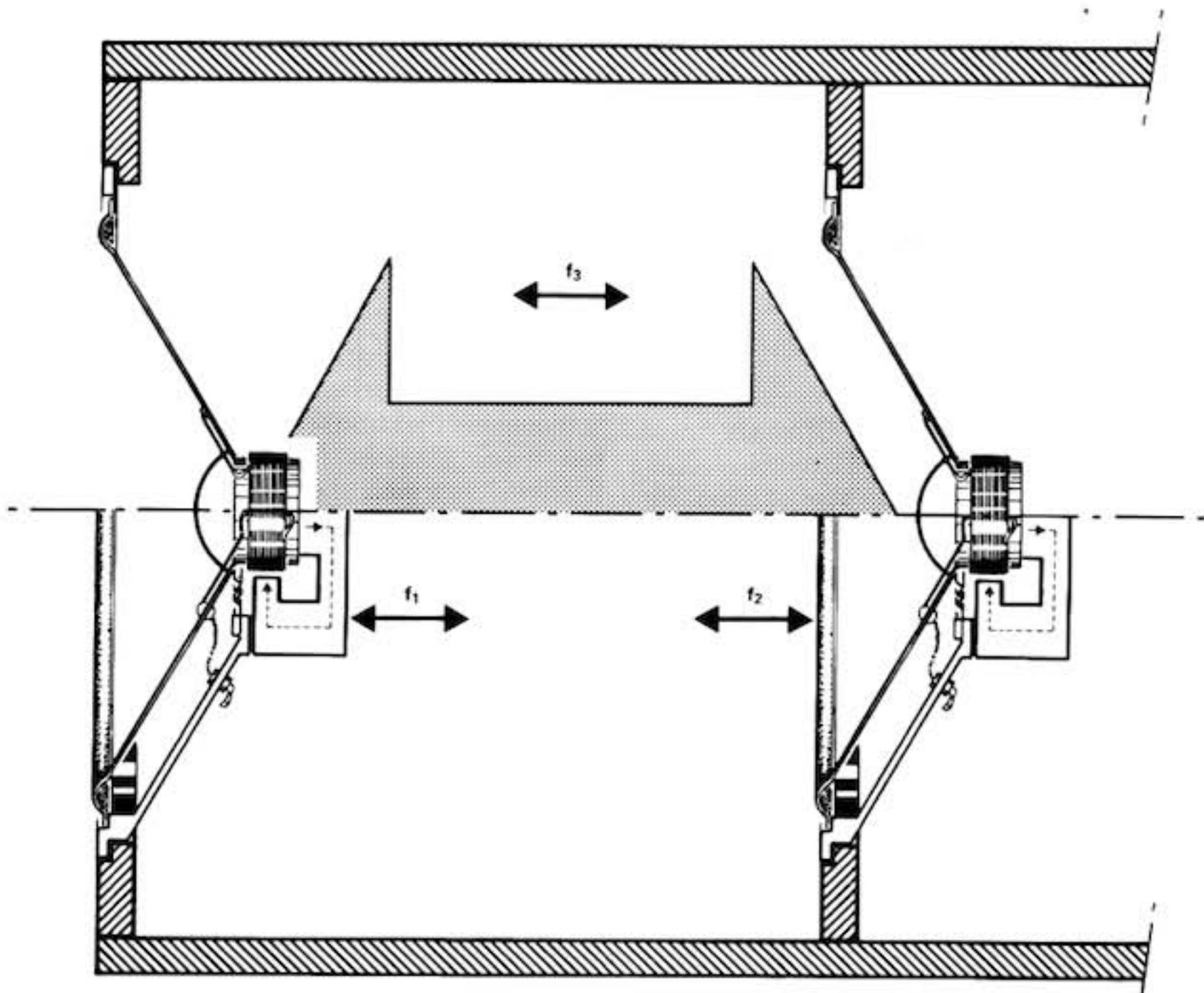
Die Compoundbox ist eine recht komplizierte Sache. Bei wahlloser Dimensionierung können die verschiedensten Resonanzen auftreten. Von einem ausgeglichenen Schalldruckverlauf kann dann nicht mehr die Rede sein. Bei richtiger Dimensionierung können Sie dagegen alles Mögliche kombinieren: verschiedene Chassis und auch mehr als zwei. Gegenüber einem Chassis gewinnt man da-

durch eine tiefere Resonanzfrequenz. Das reduziert jedoch die mechanische Belastbarkeit, da die Membranauslenkung durch die tiefere Resonanzfrequenz größer werden wird. Bei Chassis mit weniger gut konstruierten Membranen verbessert sich noch zusätzlich etwas das Impulsverhalten. Bei der Compound-Anordnung werden die Membranen nicht nur über die Schwingspule, sondern auch über die Luftbewegung in der Kammer angetrieben (Bild 4.11). Das verringert die Verformung (Walkarbeit) der Membran.

Bild 4.11. Zu den Antriebskräften f_1 und f_2 , die über die Schwingspule die Membranen bewegen; erzeugt das bewegte Luftvolumen eine Kraft f_3 . Sie greift über die gesamte Membranfläche an und wirkt so einer Membranverformung entgegen.

Bei einer guten Membran bringt das Compound-Prinzip hier keine Verbesserung. Es ist etwas für Hifi-Fans mit guten Rechnern und Programmen, die gleichzeitig über das nötige Kleingeld verfügen, um sich Chassis nach eigenen Wünschen fertigen zu lassen. Wer etwas experimentieren will, der sollte das Ersatzschaltbild aus Bild 4.10 eingehender studieren. Es gibt noch eine andere Möglichkeit, zwei oder mehr Chassis in ein Gehäuse einzubauen: nämlich parallel. Dieses Vorgehen kann aus verschiedenen Gründen sinnvoll sein. Paßt z.B. ein Baßchassis mit dem benötigten Volume-Displacement V_d nicht in das Gehäuse (schlanke Säule), müssen statt dessen zwei kleinere eingesetzt werden. Beim Einbau mehrerer Chassis dicht nebeneinander macht sich ein Effekt bemerkbar, ohne den die Beschaltungstechnik völlig aufgeschmissen wäre: die Strahlungskopplung.

11



86902-4-11

Der Wirkungsgrad der Schallerzeugung ist direkt von der effektiven Membranfläche eines Chassis abhängig. Bei mehreren Chassis ist die effektive Fläche größer, als sie sich aus den einzelnen Membranflächen berechnen würde. Das Ergebnis an einem Beispiel: Ein 46 cm Chassis mit 2,1 % Wirkungsgrad kann bei 200 Watt Eingangsleistung gerade 4 akustische Watt erzeugen. Das ist für den Hausgebrauch recht viel. Soll jedoch in einem größeren Saal mit 14000 m³ ein Schallpegel von 115 dB erzeugt werden, dann reicht es nicht. Hierfür sind etwa 100 akustische Watt erforderlich, für die insgesamt 25 einzeln aufgestellte 46 cm Chassis nötig sind. Das ist recht viel. Bei dicht nebeneinander aufgestellten Boxen sieht die Rechnung anders aus:

Zahl	Wkgsgrd	P _{el}	P _{ak}	f _{max}
1	2,1%	200	4	270
2	4,2%	400	17	150
4	8,4%	800	67	100
8	16,8%	1600	169	75
16	25,0%	3200	800	50

(Wkgsgrd = Wirkungsgrad)

Mehr als 25 % läßt sich durch Strahlungskopplung nicht realisieren; die Spalte f_{max} bezeichnet die Grenzfrequenz, bei der oberhalb Interferenzen zwischen den Chassis auftreten. Diese erfreuliche Rechnung zeigt, daß jetzt nur noch 5...6 Chassis erforderlich sind, um die 100 Watt abzustrahlen. Mit den 16 Chassis lassen sich in einem großen Raum immerhin beeindruckende 124 dB Schallpegel erzeugen. Wenn 100 akustische Watt einen Schallpegel von 115 dB liefern, dann sind es bei 800 akustischen Watt (16 Chassis dicht beieinander montiert): $P = 10 \log (800/100) + 115 \text{ dB} = 124 \text{ dB}$.

Wirkungsgrad und Belastbarkeit erhöhen sich. Fazit: Vier kleine Chassis sind effektiver als ein Chassis mit der vierfachen Membranfläche. Dafür ist aber jetzt kein größeres Gehäuse notwendig.

Beispiel : Mit acht 13 cm Chassis erzielt man die 8-fache Belastbarkeit und den 8-fachen Wirkungsgrad. Ist ein Chassis mit P_{el} = 25 W und 88 dB/1 W/1 m angegeben, ergibt das bei 25 Watt einen Pegel von maximal 101,9 dB. Bei acht Chassis und P_{el} von 200 W sind es immerhin 120 dB. Ein 38 cm Chassis ist da nicht besser. Die 13er Chassis benötigen nur 64 % des Gehäusevolumens wegen der kleineren

Membranfläche. (Wenn Sie also günstig einen Posten kleiner Chassis angeboten bekommen...)

Wer einmal 16 Stück 46er-Bässe gleichzeitig gehört hat, weiß was Schalldruck ist. Es gibt selbst unter den größten Baßhörnern nur wenige, die hier mithalten. Die Hornsysteme haben zwar auch einen sehr hohen Wirkungsgrad, aber nicht die elektrische Belastbarkeit von einigen tausend Watt.

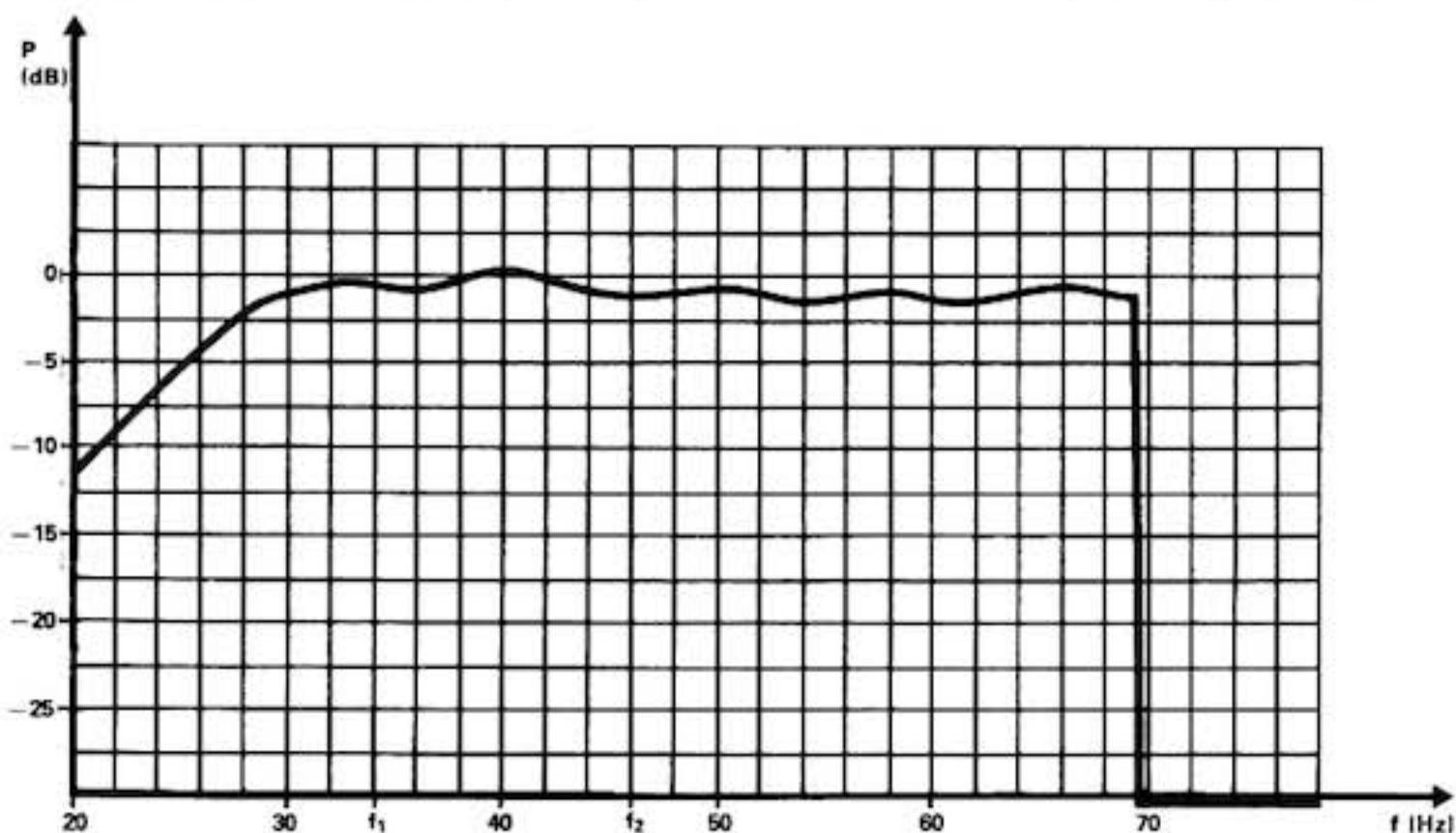
Die Berechnung von Boxen mit mehreren Chassis ist im Prinzip gleich wie die Berechnung für Boxen mit einem Chassis. Sie müssen das Gehäusevolumen nur mit der Zahl der Chassis multiplizieren, können aber etwas mehr abziehen, da eine größere mitschwingende Luftmasse die Resonanzfrequenz nach unten verlagert. Genauere Korrekturfaktoren können leider nicht angegeben werden, da sie sich nach dem Verhältnis von Membranfläche zu Membranmasse und der Anordnung der Chassis richten. Die Grenze dieses Aufbauprinzips ist durch die Ohmwerte der Chassis vorgegeben. Bei 16-Ohm Versionen sind maximal vier parallelgeschaltete Chassis zulässig, denn dann ist der Minimalwert von 4 Ohm erreicht. Für geringere Impedanzen sind meist keine geeigneten Endverstärker vorhanden. Eine Lösung ist, mehrere Chassis in Gruppen von 2...4 Stück zusammenzufassen und mehrere Verstärker einzusetzen. (Die preiswerten Hybrid-Verstärker sind mittlerweile qualitativ sehr gut.)

Kritisch wird es, wenn Lautsprecherchassis in Reihe geschaltet sind. Dabei liegt immer ein Chassis als Widerstand in Reihe zu dem anderen, so daß die Spannung an den Anschlußklemmen der Chassis nicht mehr einfach zu analysieren ist. Zusätzlich kann es durch Fertigungstoleranzen der Resonanzfrequenzen bei den verschiedenen Chassis zu einer Schalldruckkurve kommen, wie sie in Bild 4.12 dargestellt ist. Das ist ein Beispiel für zwei parallelgeschaltete Chassis.

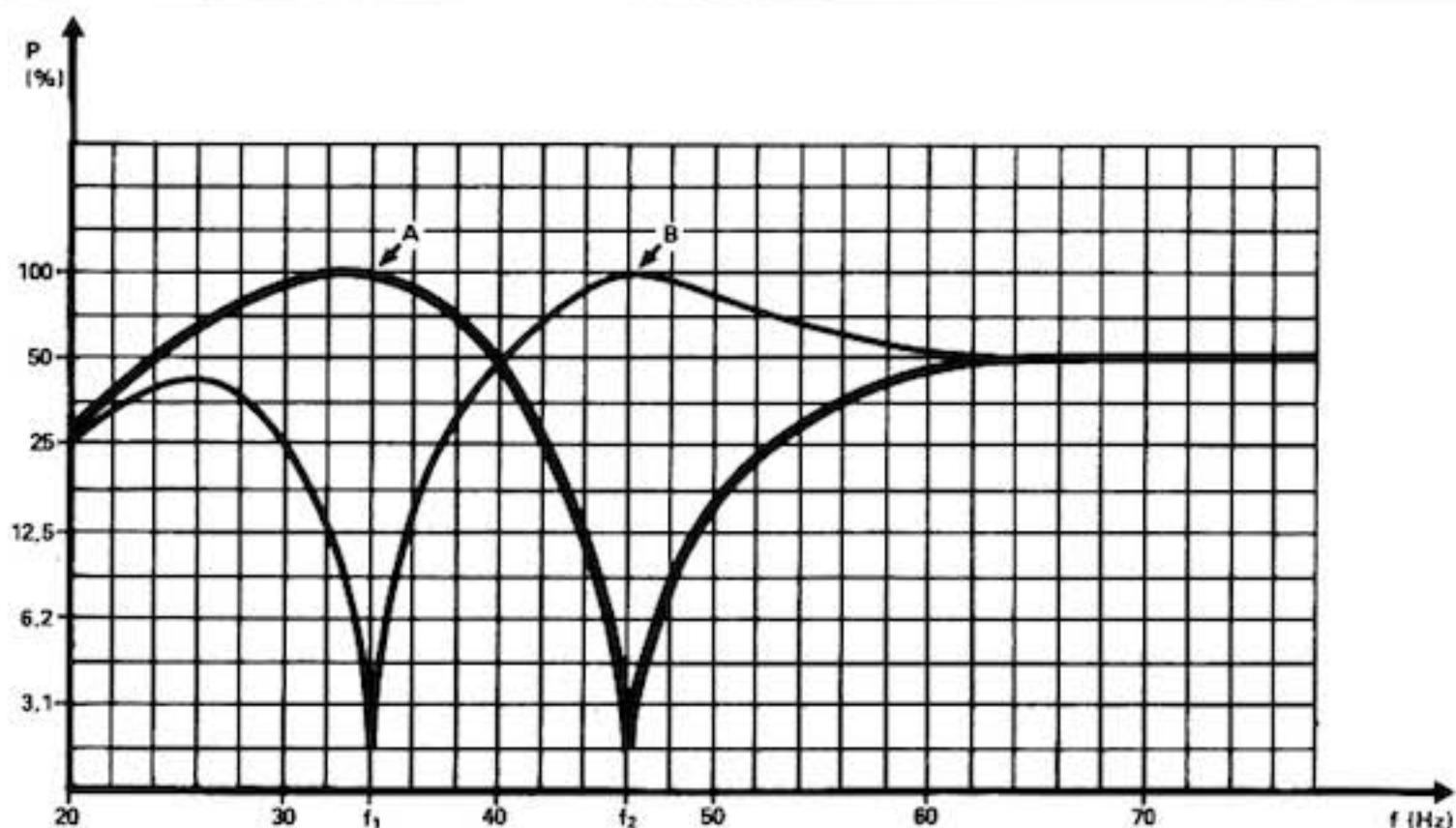
Die Verteilung der elektrischen Leistung für die beiden Chassis ist in Bild 4.13 skizziert.

Das führt alles zu einer sehr hohen mechanischen Belastung der Chassis sowie zu einer frequenzabhängigen Abstrahlcharakteristik. Beide Kurven haben nur dann einen ähnlichen Verlauf, wenn einmal die Werte für V_{as}, f_s und M_{md} ähnlich und zum anderen beide Chassis in einem Gehäuse eingebaut sind. Die Vorhersage zum Q_{tc}-Wert bleibt jedoch gewagt, da

12



13



der exakte Widerstand in der Zuleitung (das andere Chassis) nicht bekannt ist.

Besondere Vorsicht ist beim Zusammenschalten mehrerer Lautsprecherboxen angebracht, z.B. zu Beschallungszwecken. Es gibt dabei meist ein Chassis, das den Belastungstest nicht übersteht; außerdem noch jemanden, der dabei etwas Geld in Form von Reparaturkosten verliert.

Bild 4.12. Schalldrucksumme zweier parallelgeschalteter Chassis mit den Resonanzfrequenzen f_1 und f_2 .

Bild 4.13. Verteilung der Eingangsleistung auf beide Chassis.

Durch die hohe Impedanz normaler Lautsprecherchassis bei den Resonanzfrequenzen (Gegeninduktion), fließt fast die gesamte Eingangsleistung bei f_1 über Chassis A und bei f_2 über Chassis B. Von einer Erhöhung der Belastbarkeit durch die Parallelschaltung kann man also hier nicht ausgehen. Anders ist es nur bei Chassis mit exakt gleicher Resonanzfrequenz und Einbau im gleichen Gehäuse oder bei Boxen mit linearem Impedanzverlauf (Varivent bedämpft, Watkins-Prinzip usw.).

Kapitel 5

Baßreflexboxen

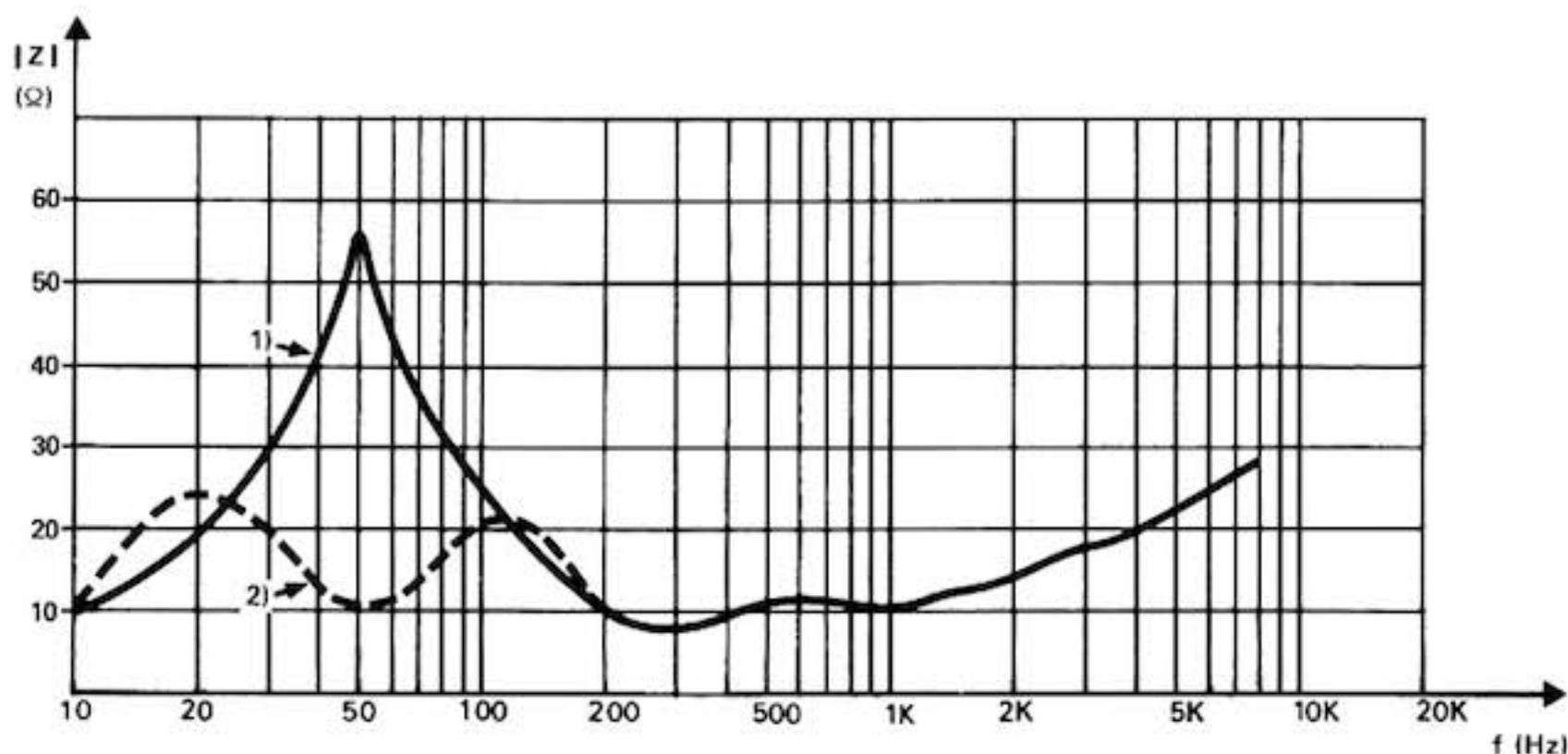
Strahlt eine Box zusätzlichen Schall phasenverdreht und zeitverzögert ab, ist meist das Baßreflexprinzip mit im Spiel. Die Idee ist einleuchtend. Es wird der von der Membranrückseite abgestrahlte Schall genutzt. Das erhöht, wenigstens theoretisch, den Wirkungsgrad einer Lautsprecherbox. Bezogen auf die Stromrechnung ist das allerdings noch nichts. Das mit dem Wirkungsgrad ist ohnehin bei Lautsprechern so eine Sache; ob nun 98 % oder 99 % der elektrischen Leistung in Wärme umgesetzt werden, ist kaum noch von Bedeutung. Beginnen wir die Betrachtungen zu den Baßreflexboxen mit einem Vergleich zur Impedanzkurve einer geschlossenen Box. Dazu genügt ein kurzer Blick auf Bild 5.1.

Kurve 1 gehört zu einem geschlossenen System, während Kurve 2 den Impedanzverlauf von Baßreflexboxen wiedergibt. Aus der Impedanzüberhöhung macht die Baßreflexbox eine Absenkung bei der Resonanzfrequenz. Das ist der bemerkenswerte Aspekt des Baßreflex-

Bild 5.1. Typische Impedanzkurven einer geschlossenen Box (1) und einer Baßreflexbox (2).

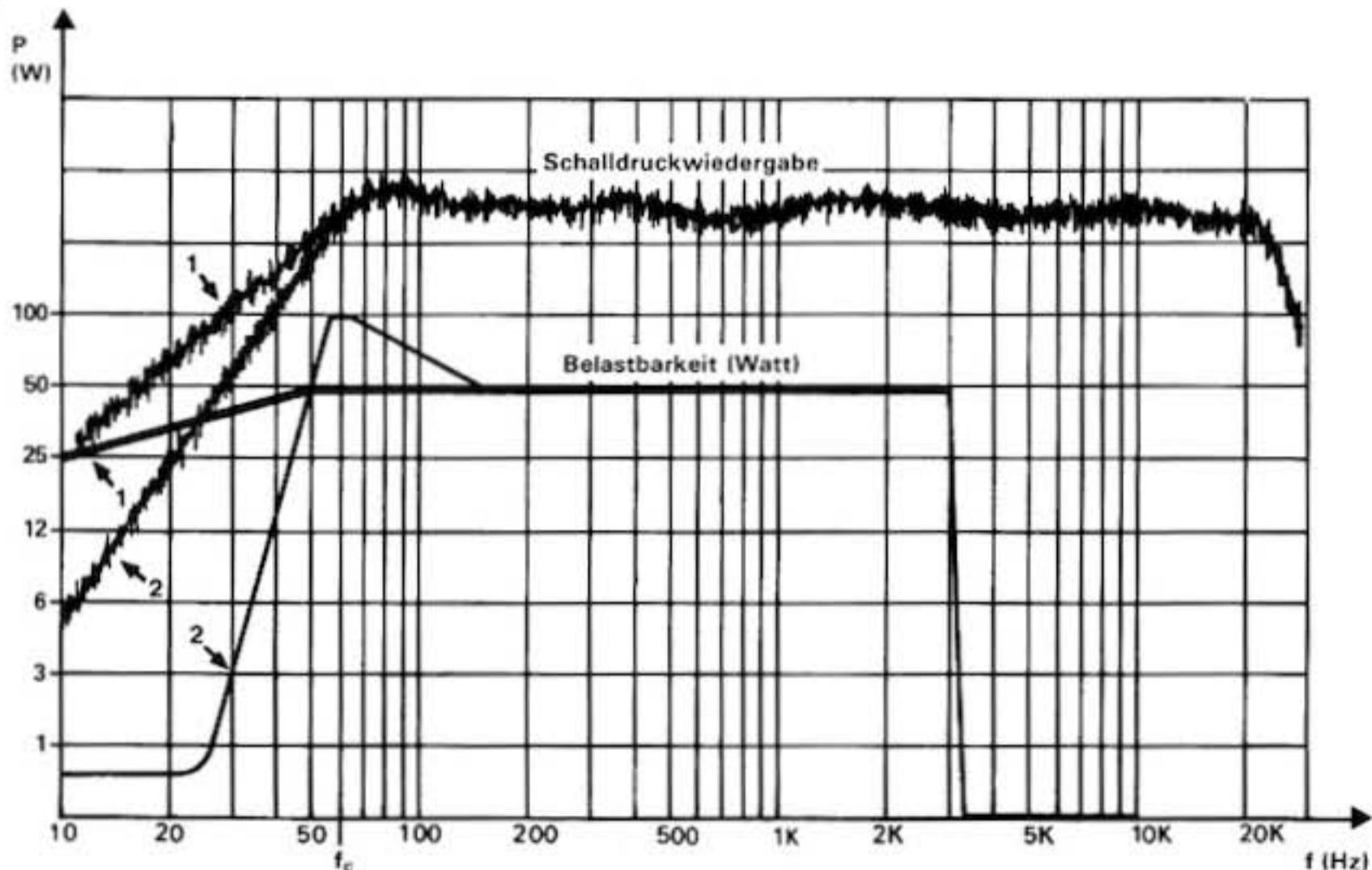
Prinzips, denn wenig Gegeninduktion bedeutet wenig Membranbewegung (außer bei Hornlautsprechern). Eine verringerte Bewegung der Membran bedeutet wiederum, daß die gleiche akustische Leistung auch mit einer kleineren (leichteren) Membran zu erzeugen ist. Das spart Magnetmaterial, so daß das Baßreflex-Prinzip bei vielen Herstellern einen guten Ruf hat. Es ist möglich, für die gleiche untere Grenzfrequenz (-3 dB), den gleichen maximalen Schallpegel und das gleiche Gehäusevolumen mit nur 20 % des Magnetmaterials für ein Tieftonchassis auszukommen, das bei einer geschlossenen Box 2ter Ordnung notwendig wäre. Wie aber sieht es mit dem Schalldruck und der Belastbarkeit aus? Gibt es auch hier keine Unterschiede? Ein Blick auf die Kurven in Bild 5.2 beantwortet diese Fragen. Beim Schalldruck und der Belastbarkeit unterscheiden sich beide Systeme doch erheblich. Unterhalb der Grenzfrequenz wird die Wiedergabe der Baßreflexbox dünner als die der geschlossenen Box. Auch nimmt die Belastbarkeit rapide ab. Leistungen von wenigen Watt können die Membran an den mechanischen Anschlag treiben. Störgeräusche gar, die bei

1



86902-5-1

2



3

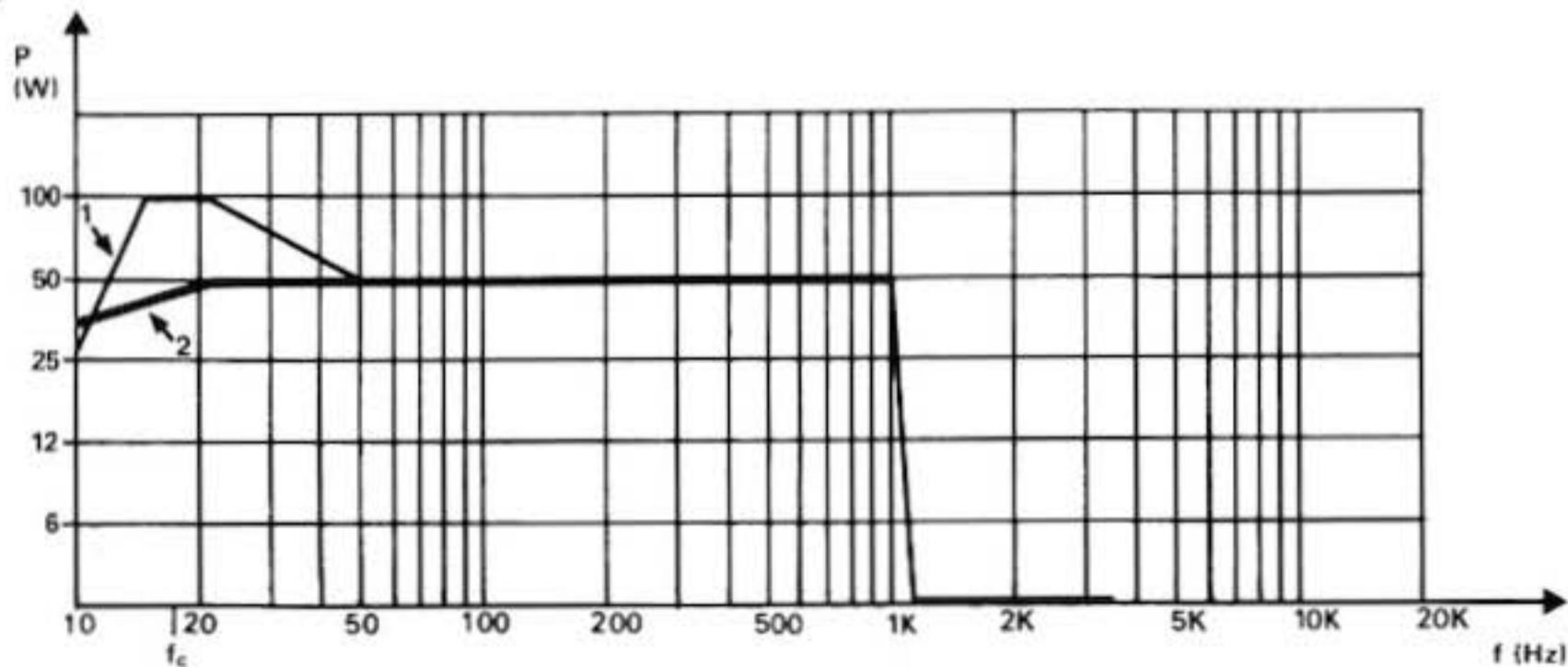


Bild 5.2. Schalldruckwiedergabe und Belastbarkeit einer geschlossenen Box (1) und einer Bassreflexbox (2).

Bild 5.3. Nur bei Bassreflexboxen mit sehr niedrigen Resonanzfrequenzen (2) besteht ein ausreichender Schutz vor tieffrequenten Musik- und Störsignalen (1 = geschlossene Box).

tiefen Frequenzen die volle Verstärkerleistung mobilisieren, können die Membran auch über

diesen Anschlag hinausbewegen. Die geschlossene Box verfügt hierbei über deutliche Sicherheitsreserven. Anders wird es bei sehr tief abgestimmten Bassreflexboxen (Bild 5.3). Das Thema Bassreflexboxen ist nicht nur aus diesem Grund umstritten, auch hinsichtlich der Berechnung gibt es verschiedene Meinungen. Die eine Seite überhäuft Sie mit Computerprogrammen zur optimierten Berechnung der Gehäuse. Die andere Seite behauptet schlicht, Bassreflexgehäuse seien nicht bere-

chenbar, auch nicht mit diesen Computerprogrammen. Das ist schwer zu widerlegen. In einem älteren Buch, Loudspeakers von G.A. Briggs, finden Sie die in Bild 5.4 dargestellte Zeichnung (Maßangaben in Zoll).

Sie stimmt nachdenklich. Offensichtlich ist der Einfluß der Gehäuseform bei tiefen Frequenzen größer als allgemein erwartet. Wenn Sie nach dem Ersatzschaltbild suchen, auf dem alle neuere Theorie basiert und mit dem alle Computerprogramme rechnen, stoßen Sie auf die Darstellung aus Bild 5.5.

Das Ersatzschaltbild stimmt ebenfalls nachdenklich, denn es ist nicht ausreichend. Hier wird die Strahlungs-Koppelung von Membran und Reflexöffnung nicht berücksichtigt.

4

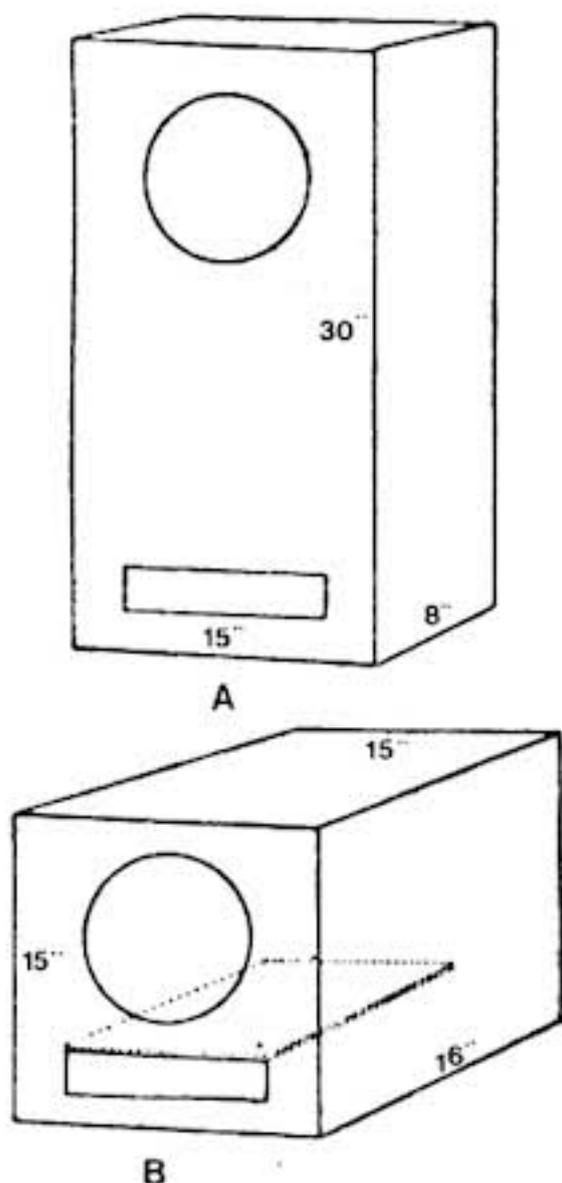


Bild 5.4.

Bild 5.5. Das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Baßreflexbox.

R_g = Generatorinnenwiderstand in Ohm

R_{dc} = Gleichstromwiderstand der Schwingspule in Ohm

L_{vc} = Induktivität der Schwingspule in Henry

$C1 = M_{md}/(BI)^2$ in Farad (bewegte Masse des Chassis)

$L1 = C_{ms} \cdot (BI)^2$ in Henry (Nachgiebigkeit der Aufhängung)

$R1 = (BI)^2/R_{ms}$ in Ohm (Reibung in der Aufhängung)

$C2 = M_{mv}/(BI)^2$ in Farad (bewegte Masse im Reflexstapel)

$L2 = C_{ab} \cdot (BI)^2$ in Henry (Nachgiebigkeit der Gehäuseluft)

$R2 = (BI)^2/R_{mv}$ in Ohm (Reibung der Luft im Reflexstapel)

$$C_{ab} = \frac{V_{box}}{\rho \cdot c^2 \cdot S_d^2}$$

In diesem Modell werden die Strahlungs-impedanzen von Membran und Baßreflexöffnung nicht berücksichtigt. Der Einfluß einer Strahlungskopplung beider Flächen ist damit in den Ergebnissen einer Berechnung nicht enthalten.

6a

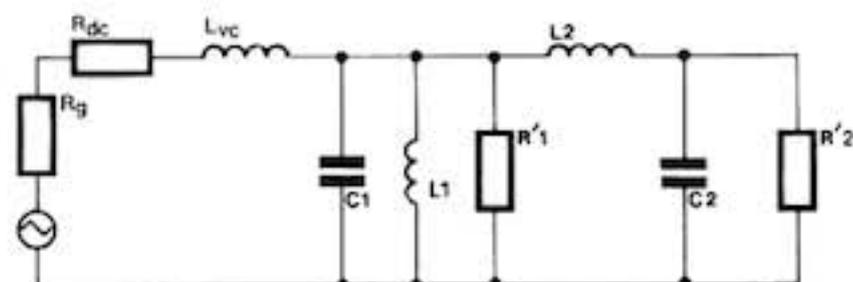
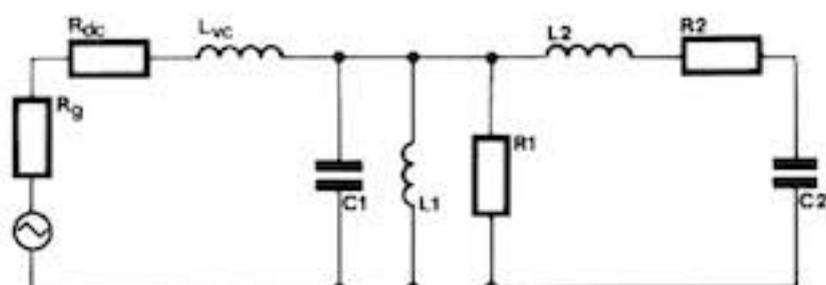
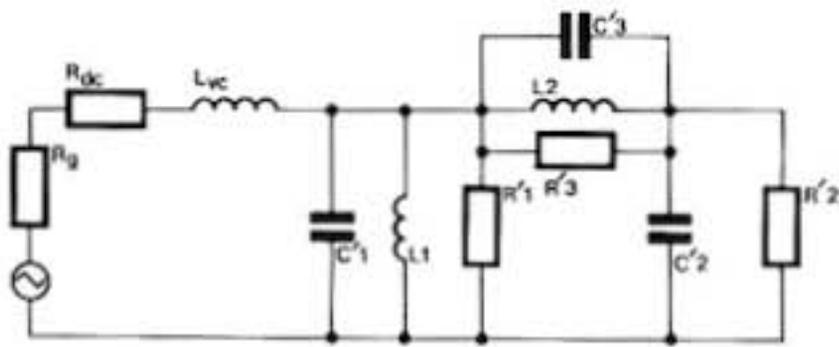


Bild 5.6a. In dem Ersatzschaltbild aus Bild 5.5. werden die Reibungswiderstände $R1$ und $R2$ durch die frequenzabhängigen Strahlungswiderstände von Membran (R_{strm}) und Reflexöffnung (R_{strv}) ersetzt. Auch dieses Ersatzschaltbild berücksichtigt noch nicht den Einfluß der Strahlungskopplung.

5



6b



$R'1 = (BL)^2/R_{strm}$ (Strahlungswiderstand der Membranfläche)

$R'2 = (BI)^2/R_{strv}$ (Strahlungswiderstand der Reflexöffnung)

$$R_{strm}, R_{strv} = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \left[\frac{J_1(2kR)}{k \cdot R} \right]$$

$\rho = 1,189 \text{ kg/m}^3$ Dichte der Luft

$c = 344 \text{ m/s}$ Schallgeschwindigkeit der Luft

$f =$ Frequenz in Hz

$R =$ Radius der Membran (bzw. Tunnelöffnung)

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c}$$

$J_1 =$ Besselfunktion 1ter-Ordnung

Bild 5.6b. Wird der Einfluß der Strahlungskopplung berücksichtigt, so muß das Ersatzschaltbild aus Bild 5.6a. etwas verändert werden. Die Strahlungskopplung beeinflußt die Strahlungswiderstände und die bewegten Massen von Membran und Reflexöffnung und erzeugt zusätzlich eine neue Luftmasse $C'3$. Diese wird im Nahfeld zwischen Membran und Reflexöffnung verschoben, wenn die Schallabstrahlung nicht mit gleicher Phasenlage erfolgt. Hierbei wird dem schwingenden System Energie entzogen, die sonst zur Schallerzeugung beigetragen hätte.

Berechnungen mit diesem Ersatzschaltbild sind erheblich komplizierter als die üblichen Berechnungen, und übersteigen den Rahmen dieses Buches. Um sich als Boxenkonstrukteur dennoch ein Bild vom Einfluß der Strahlungskopplung machen zu können, zeigen die Bilder 5.6c. und 5.6d. die Unterschiede bei einer Berechnung mit einem Computer-Programm.

6c

Response-Plot Baßreflex & IB 2 / 4

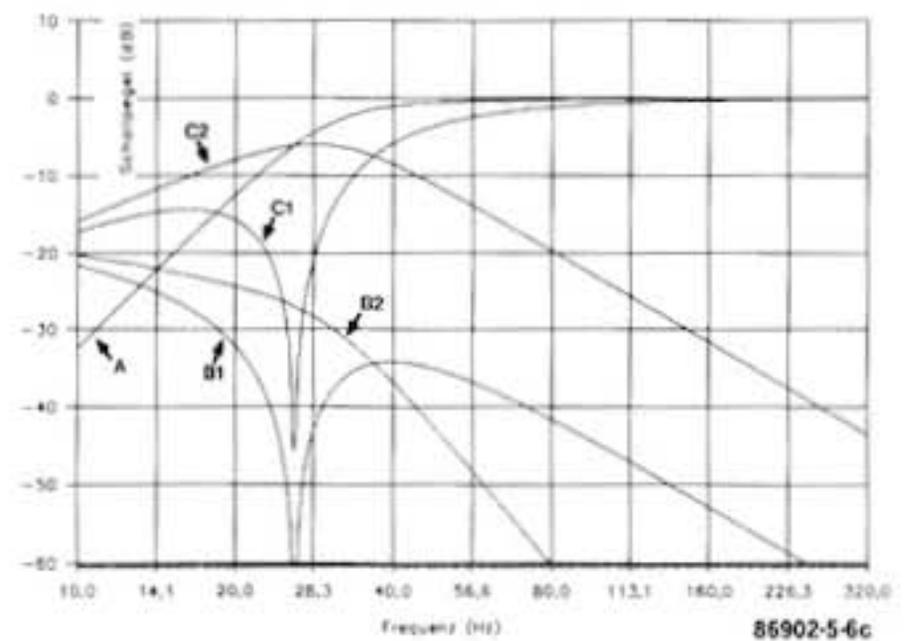


Bild 5.6c. Der Einfluß der Strahlungskopplung ist maximal, wenn die Flächen von Membran und Reflextunnel identisch sind und deren Abstand gering ist. Diese Situation wurde bei der Kurvenberechnung simuliert. Die Baßreflexbox hat ein Gehäusevolumen von $0,09 \text{ m}^3$ und die Gehäuseresonanzfrequenz beträgt 26 Hz . Das eingesetzte Chassis hat folgende Daten:

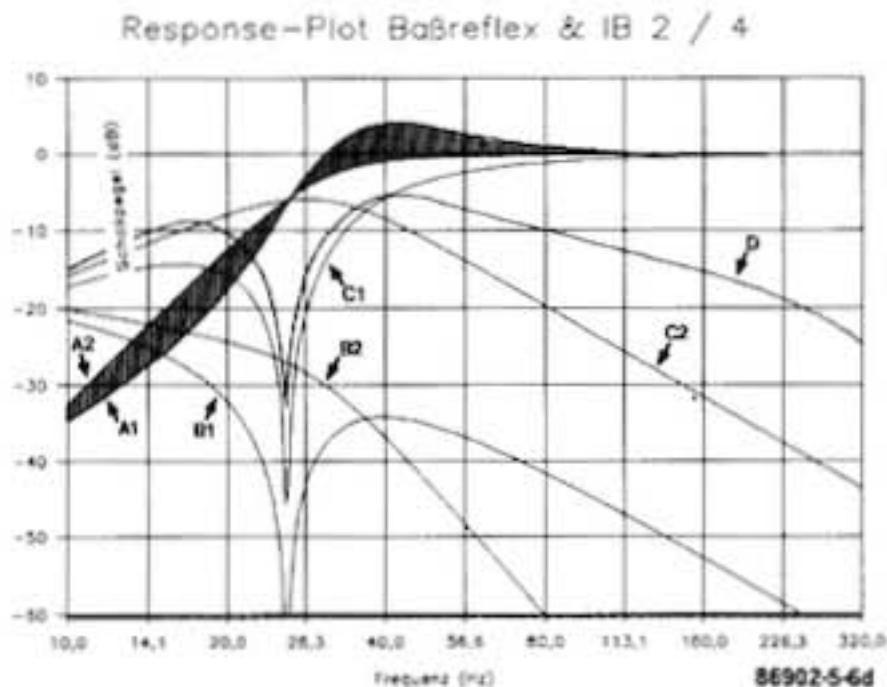
$BI = 14 \text{ Tm};$	$C_{ms} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ N/m};$
$R_{dc} = 7 \text{ Ohm};$	$Q_{es} = 0,314$
$R_{ms} = 3,7 \text{ Ohm};$	$Q_{ms} = 2,377$
$S_d = 0,049 \text{ m}^2;$	$Q_{ts} = 0,277$
$M_{md} = 0,07 \text{ kg};$	

Die Abstimmung der Box kann z.B. durch eine Passivmembran erfolgen. Wenn die Fläche der Passiv-Membran gleich der Membranfläche des Chassis sein soll, muß die bewegte Masse der Passiv-Membran $0,144 \text{ kg}$ betragen.

Die Kurven zeigen die Auslenkung für die Membran (B1) und für den Reflextunnel bzw. für die Passiv-Membran (B2) sowie den Schalldruckanteil C1 (Membran) und C2 (Reflextunnel bzw. Passiv-Membran). Kurve A stellt den Betrag der komplexen Addition der Kurven C1 und C2 dar.

Bild 5.6d. In diesem Diagramm ist zusätzlich der Einfluß der Strahlungskopplung eingetragen (Kurve D). Der rechte Teil der

6d



Kurve (oberhalb von 26 Hz) bezeichnet den Gewinn durch die Kopplung der beiden Flächen. Der Wirkungsgrad des System ist oberhalb der Gehäuseresonanz um etwa 3 dB höher als bei den Kurven in Bild 5.6c.

Der linke Teil der Kurve (unterhalb von 26 Hz) bezeichnet die Verlustleistung durch den Energieaustausch zwischen beiden Flächen. Unterhalb der Gehäuseresonanz strahlen die beiden Flächen den Schall nicht gleichphasig ab, so daß zwischen ihnen eine Luftmasse verschoben wird, was dem schwingenden System Energie entzieht. Der Betrag der Kurve entsteht deshalb durch eine Subtraktion von der Schalldrucksummenkurve. Der Wirkungsgrad unterhalb der Gehäuseresonanz ist gegenüber dem Bild 5.6c deutlich schlechter.

Zusammen mit dem Aufbau einer Baßreflexbox (Bild 5.7) ist deutlich, worauf es ankommt.

Neben dem schwingungsfähigen System Membranmasse, Membranaufhängung und Gehäusefedersteife ist bei der Baßreflexbox ein weiteres schwingungsfähiges System eingebaut. In der Baßreflexöffnung befindet sich eine bestimmte Masse Luft, die ebenfalls mit den Federn der Membranaufhängung und der Gehäuseluft schwingt. Dabei wirkt die gleichförmig bewegte Luftmasse als Membran und kann so Schallenergie abstrahlen. Die Anregung dieser Schwingung erfolgt durch das

7

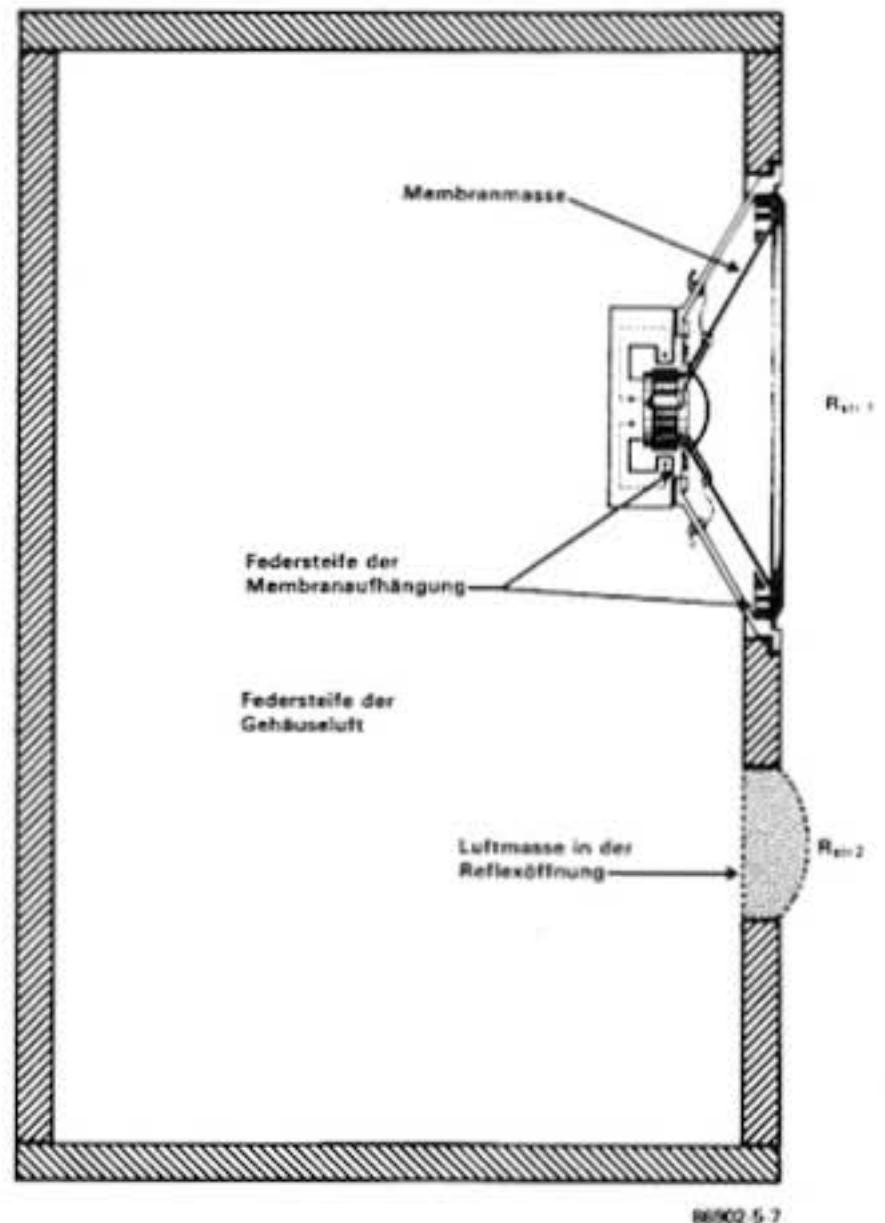


Bild 5.7. Prinzipieller Aufbau einer Baßreflexbox. Grundsätzlich handelt es sich um zwei gekoppelte Schwingkreise, deren Berechnung bei tiefen Frequenzen noch recht einfach ist.

Lautsprecherchassis. Das Problem besteht im Grunde nur darin, alles so abzustimmen, daß aus der Baßreflexöffnung zur richtigen Zeit die richtige Menge der richtigen Frequenzen abgestrahlt wird. Richtig bedeutet hier, daß die Addition der Signale von Membran und Reflexöffnung die gewünschte Übertragungsfunktion ergibt (z.B. wieder Butterworth). Wenn dieses Ziel erreicht wird, dann erfolgt bei tiefen Frequenzen die Schallabstrahlung hauptsächlich über die Baßreflexöffnung. Das Chassis sieht neben dem Strahlungswiderstand auf der Membranvorderseite jetzt gleichzeitig den sehr hohen Strahlungswiderstand der schwingenden Luftmasse, die über die Membranrückseite an das Chassis angekoppelt ist. Das reduziert die nötige Membranauslenkung. Im Gegensatz zu Hornlautsprechern ist aber der Strahlungswiderstand der schwingenden Luftmasse nur in der Nähe einer Fre-

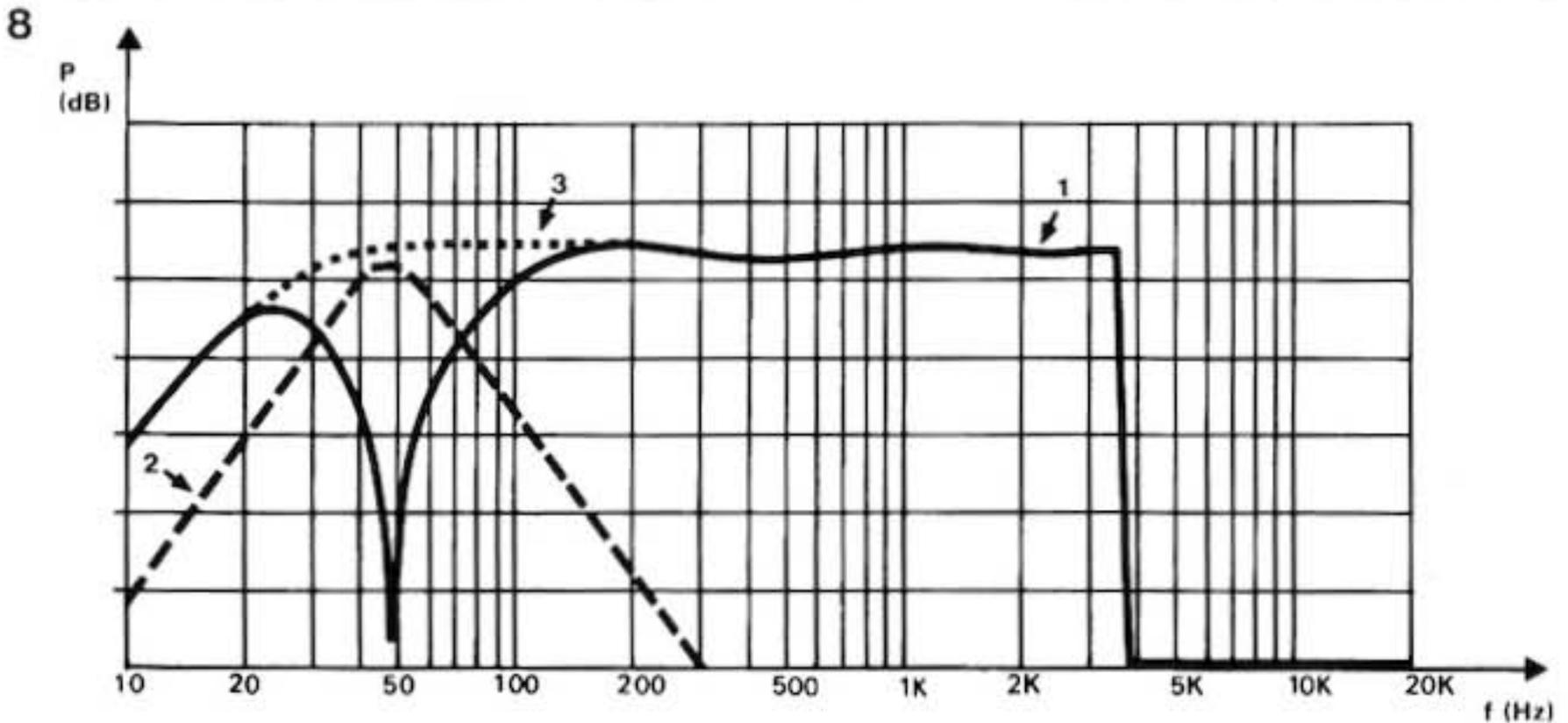


Bild 5.8. Kurve 1 ist die Schalldruckkurve des Chassis, Kurve 2 die der Reflexöffnung und Kurve 3 ist die Summe der komplexen Addition. Komplexe Addition deshalb, weil neben der Signalamplitude auch die Phasenlage eine wichtige Rolle spielt und sie in die Berechnungen mit einbezogen werden muß.

quenz sehr hoch, da dieser Strahlungswiderstand nicht durch eine große Strahlerfläche (wie bei Hörnern), sondern durch die große Auslenkung der schwingenden Luftmasse bei der Resonanzfrequenz erzeugt wird. Die entsprechenden Schalldruckkurven eines solchen Systems sind in Bild 5.8 zu sehen.

Das kann bei richtiger Abstimmung Vorteile bringen. Eine Membran gleicher Größe muß für gleichen Schalldruck in einem Baßreflexgehäuse geringere Auslenkungen machen als in einer geschlossenen Box. Dadurch reduzieren sich die Verzerrungen durch Nichtlinearitäten des Chassis. Das gilt auch für die Intermodulationsverzerrungen, die immer dann entstehen, wenn eine bewegte Membran gleichzeitig verschiedene Frequenzen abstrahlt (Bild 5.9). Über die Hörbarkeit dieser Intermodulationsverzerrungen (kurz IM) streiten sich die Gelehrten nicht zuletzt deshalb, weil oft nicht so genau festzustellen ist, ob jetzt die Nichtlinearität des Chassis oder die IM-Verzerrungen störend wirken. Dazu jedoch später mehr. Zunächst halten wir einfach fest, daß eine Verringerung der IM-Verzerrungen sicherlich kein Fehler ist. Manchmal ist es sogar eine Not-

wendigkeit, denn sehr viele Lautsprecherchassis sind für den Einsatz in Baßreflexboxen konzipiert worden. Die Hersteller haben dabei direkt Schwingspule und Polplatten für die geringeren nötigen Auslenkungen dimensioniert, also den linearen Hub auf 1 bis 3 Millimeter verringert. Diese Chassis müssen zur Wiedergabe tieferer Frequenzen in Baßreflexboxen (oder Horngehäuse) eingebaut werden, sonst steigen k_3 und die resultierenden Verzerrungen bereits bei geringen Schallpegeln auf gut hörbare Werte an. Perfekt ist das Ergebnis damit aber nicht in allen Fällen. Bei tiefrequenten Störgeräuschen oder höheren Schallpegeln kann die Kurzhubspule den Luftspalt teilweise verlassen. Die resultierenden Veränderungen im BI-Produkt bringen damit die ganze schöne Abstimmung wieder durcheinander.

Wenn Langhubchassis in Baßreflexgehäuse eingebaut werden, so ist das aus dem genannten Grund natürlich kein Fehler. Die größere lineare Auslenkung erlaubt jetzt weit höhere Schallpegel als ein Kurzhubchassis. Nur kostet das hohe BI-Produkt bei einer Langhubspule erheblich mehr Magnet, was solche Chassis sehr teuer und deshalb seltener macht.

Das Baßreflex-Prinzip hat noch zwei weitere Nachteile. Einmal darf das Gehäuse nur mit sehr wenig Dämmmaterial gefüllt werden, weil man die Schallenergie im Gehäuse ja nicht vernichten darf. Zum anderen muß das Gehäuse sehr genau auf das jeweilige Chassis abgestimmt sein.

Das Ersatzschaltbild in Bild 5.6 läßt schon ver-

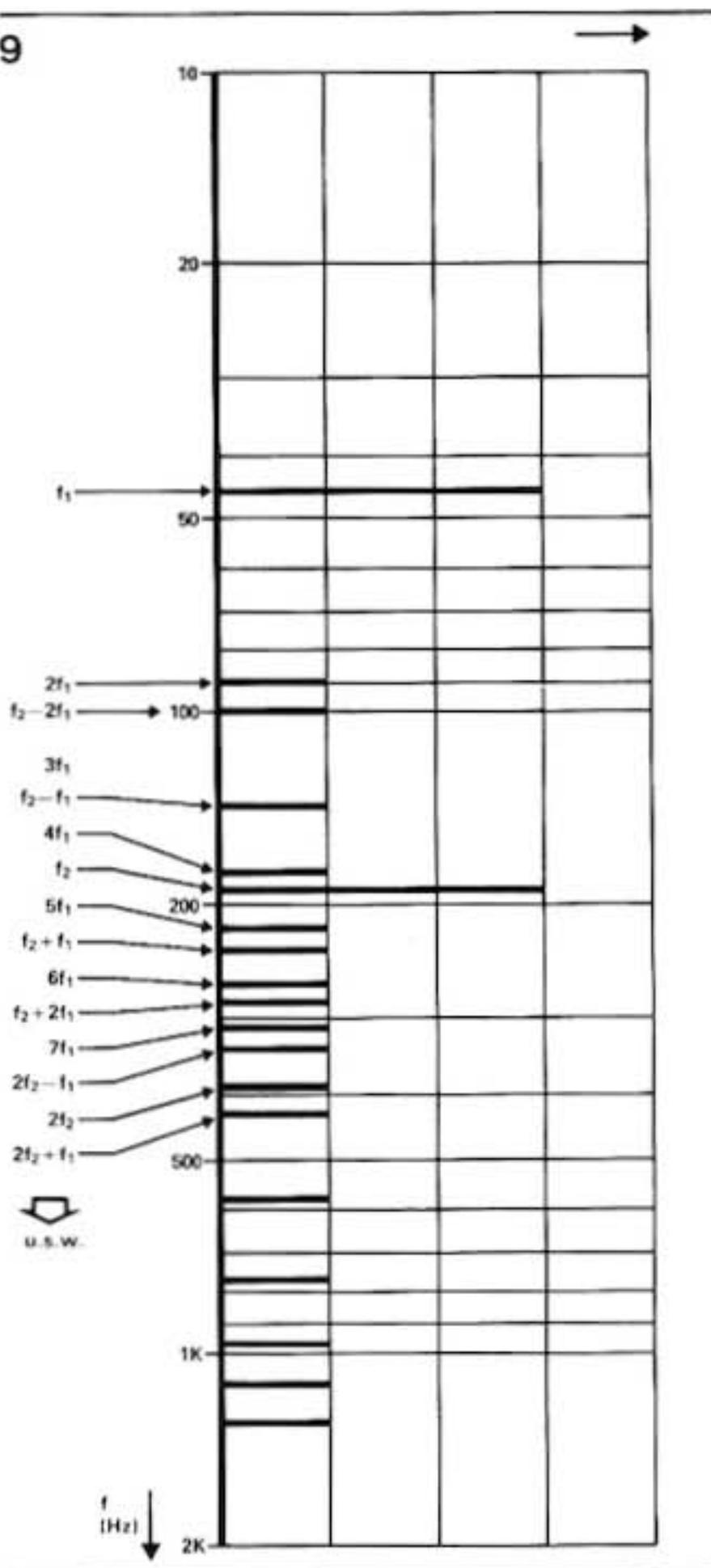


Bild 5.9. Wenn gleichzeitig zwei Frequenzen ($f_1 = 45 \text{ Hz}$ und $f_2 = 190 \text{ Hz}$) von einem Lautsprecher abgestrahlt werden, bilden sich als Folge von Nichtlinearitäten und Modulationsverzerrungen neue Frequenzen.

$2f_1 = 90 \text{ Hz}$	$2f_2 = 380 \text{ Hz}$	$f_2 + f_1 = 235 \text{ Hz}$
$3f_1 = 135 \text{ Hz}$	$3f_2 = 570 \text{ Hz}$	$f_2 - f_1 = 145 \text{ Hz}$
$4f_1 = 180 \text{ Hz}$	$4f_2 = 760 \text{ Hz}$	$f_2 + 2f_1 = 280 \text{ Hz}$
$5f_1 = 225 \text{ Hz}$	$5f_2 = 950 \text{ Hz}$	$f_2 - 2f_1 = 100 \text{ Hz}$
$6f_1 = 270 \text{ Hz}$	$6f_2 = 1140 \text{ Hz}$	$2f_2 + f_1 = 425 \text{ Hz}$
$7f_1 = 315 \text{ Hz}$	$7f_2 = 1330 \text{ Hz}$	$2f_2 - f_1 = 335 \text{ Hz}$
usw.	usw.	usw.

muten, daß bereits bei einer geringen Abweichung einiger Komponenten (und nicht erst bei der Änderung aller über das BI-Produkt) erhebliche Abweichungen der Übertragungsfunktion vom gewünschten Verlauf eintreten können. Neben den bereits bekannten Übertragungsfunktionen wie z.B. Butterworth, Bessel und Chebycheff, gibt es noch einige mehr: Quasi-Butterworth QB-3, Superquasi-Butterworth SQB-3, Sub-Chebycheff, SC-4, Boombox BB-4, Subboombox SBB-4 und Inter-Order Butterworth IB-4. Dadurch wird das alles etwas unübersichtlich. Je nach vorhandenem Chassis und gewünschter Grenzfrequenz kann man das Gehäuse auf eine dieser Übertragungsfunktionen abstimmen (oder auch nicht). Zwischen diesen Übertragungsfunktionen liegen weniger brauchbare Abstimmungen. Auf eine davon werden Sie treffen, wenn man wahllos Chassis und Gehäuse kombiniert und einen Reflextunnel einsetzt. (Auf diese Weise sind schon einige sehr gute Boxen für Musiker entstanden, beispielsweise für Baßgitaristen, aber kaum brauchbare Hifi-Boxen.) Was können wir tun? Wir können uns durch lange Listen arbeiten, in denen die Parameter zur Abstimmung verschiedenster Chassis für verschiedenste Übertragungsfunktionen zu finden sind. In diesen Listen sind abhängig vom Q_{ts} - und V_{as} -Wert des Chassis das richtige Gehäusevolumen und die Frequenzen aufgeführt, auf die das Chassis und das Gehäuse abzustimmen sind. Das Beispiel einer solchen Tabelle zeigt Bild 5.10. Mit einem gegebenen Wert Q_{ts} beginnt die Rechnung. Für die Resonanzfrequenz der Box gilt:

$$f_{\text{box}} = h \cdot f_s$$

Das Gehäusevolumen errechnet sich mit dem α -Wert und dem Wert für V_{as} :

$$V_{\text{box}} = \frac{V_{as}}{\alpha}$$

Die voraussichtliche -3 dB Frequenz für die halbkugelförmige Abstrahlung finden wir nach der Beziehung:

$$\frac{f_{-3 \text{ dB}}}{f_s}$$

In der Tabelle von Bullock (Bild 5.10) ist der Verlustfaktor Q_1 angegeben. Reibungsverluste im Gehäuse und im Reflextunnel, mitschwin-

10 Tabelle zur Abstimmung von Baßreflexgehäusen

Q_{ts}	Verlustfaktor $Q_1 = 5$			Verlustfaktor $Q_1 = 10$		
	h	α	$\frac{f_{-3}}{f_s}$	h	α	$\frac{f_{-3}}{f_s}$
0,20	2,0014	7,5746	2,5914	1,8960	7,9232	2,4845
0,21	1,9080	6,7702	2,4566	1,8085	7,0834	2,3543
0,22	1,8232	6,0730	2,3332	1,7292	6,3554	2,2351
0,23	1,7459	5,4646	2,2198	1,6569	5,7202	2,1255
0,24	1,6751	4,9306	2,1151	1,5908	5,1627	2,0241
0,25	1,6101	4,4594	2,0180	1,5301	4,6706	1,9299
0,26	1,5502	4,0415	1,9276	1,4742	4,2342	1,8421
0,27	1,4948	3,6691	1,8430	1,4225	3,8452	1,7599
0,28	1,4434	3,3358	1,7637	1,3747	3,4971	1,6826
0,29	1,3957	3,0364	1,6889	1,3303	3,1843	1,6097
0,30	1,3512	2,7663	1,6183	1,2890	2,9022	1,5406
0,31	1,3097	2,5220	1,5514	1,2505	2,6469	1,4748
0,32	1,2708	2,3001	1,4877	1,2146	2,4150	1,4121
0,33	1,2344	2,0980	1,4269	1,1809	2,2038	1,3521
0,34	1,2003	1,9134	1,3687	1,1493	2,0109	1,2945
0,35	1,1681	1,7444	1,3129	1,1197	1,8342	1,2390
0,36	1,1378	1,5893	1,2592	1,0918	1,6719	1,1855
0,37	1,1093	1,4464	1,2074	1,0834	1,4905	1,1651
0,38	1,0823	1,3147	1,1567	1,0578	1,3552	1,1153
0,39	1,0568	1,1929	1,1095	1,0335	1,2300	1,0674
0,40	1,0326	1,0801	1,0632	1,0103	1,1146	1,0215
0,41	1,0095	0,9757	1,0190	0,9886	1,0070	0,9777
0,42	0,9877	0,8785	0,9767	0,9662	0,9113	0,9373
0,43	0,9652	0,7920	0,9377	0,9436	0,8266	0,9001
0,44	0,9425	0,7154	0,9016	0,9212	0,7521	0,8660
0,45	0,9200	0,6480	0,8684	0,8992	0,6868	0,8348
0,46	0,8979	0,5888	0,8379	0,8780	0,6297	0,8064
0,47	0,8766	0,5370	0,8100	0,8578	0,5798	0,7804
0,48	0,8560	0,4915	0,7844	0,8385	0,5361	0,7567
0,49	0,8364	0,4516	0,7609	0,8203	0,4978	0,7351
0,50	0,8171	0,4166	0,7395	0,8031	0,4642	0,7155
0,51	0,8022	0,3857	0,7198	0,7870	0,4345	0,6975
0,52	0,7836	0,3583	0,7017	0,7719	0,4083	0,6810
0,53	0,7680	0,3340	0,6852	0,7578	0,3849	0,6659
0,54	0,7533	0,3122	0,6699	0,7445	0,3640	0,6520
0,55	0,7394	0,2927	0,6558	0,7321	0,3453	0,6393

Q_{ts} = Güte des Chassis bei der Resonanzfrequenz f_s

h = Gehäuseresonanzfrequenz f_b /Resonanzfrequenz f_s

α = V_{as} des Chassis/Gehäusevolumen der Reflexbox

f_{-3} = -3 dB Frequenz der Baßreflexbox/ f_s

Bild 5.10. Tabelle zur Berechnung von Baßreflexgehäusen (nach R.M. Bullock III) in Abhängigkeit vom Q_{ts} -Wert des verwendeten Chassis.

gende Wände des Gehäuses oder undichte Chassis verursachen eine Verringerung des Outputs der Baßreflexöffnung und verursachen so eine Fehl Abstimmung. Den wirklichen

Verlustfaktor Q_1 kennt man allerdings erst, wenn die Box fertig ist. Wenn Sie perfekte Ergebnisse anstreben, wirft das verschiedene Probleme auf. Erstens sollte Q_{15} genauestens bekannt sein; unter Berücksichtigung aller später vorgeschalteten Widerstände. Mit diesem Q'_{15} können wir dann Werte aus der Tabelle entnehmen; welche aber sind richtig? Vergleichen wir in der Tabelle die Werte für $Q_1 = 5$ und $Q_1 = 10$. Je größer die Verluste werden, um so größer muß hier das Gehäuse sein. Das gilt auch für höhere Q_{15} -Werte. Es ist daher immer gut, das Volumen etwas größer als errechnet zu wählen. Es ist bei den Baßreflexboxen also genau entgegengesetzt, wie bei den geschlossenen Boxen.

Nach diesen Vorbereitungen wird ein passender Reflextunnel errechnet; dieser ist ja auch noch im Gehäuse unterzubringen, folglich muß sein Brutto-Volumen ebenfalls zum Gehäusevolumen addiert werden. Die Berechnung des Reflextunnels geschieht nach folgendem Muster:

$$L_v = \frac{S_v}{\frac{4\pi}{c^2} \cdot V_{\text{box}} \cdot f_{\text{box}}^2} - 0,825 \sqrt{S_v}$$

L_v = Länge des Baßreflextunnels in m
 S_v = Querschnitt des Baßreflextunnels in m^2
 V_{box} = Gehäusevolumen in m^3
 c = Schallgeschwindigkeit 344,4 m/s
 Der Tunnelquerschnitt S_v darf nicht zu klein werden:

$$S_v = 0,8 \cdot f_{\text{box}} \cdot V_d$$

f_{box} = Resonanzfrequenz des Gehäuses in Hertz

V_d = Volume Displacement des Chassis in m^3
 S_v in m^2

Diese Formel enthält einen Korrekturfaktor, da der Reflextunnel auf einer Seite bündig mit der Gehäusewand abschließt. Die tatsächliche Länge des Tunnels ist kürzer als sie sich nach der Helmholtz-Resonanz berechnet.

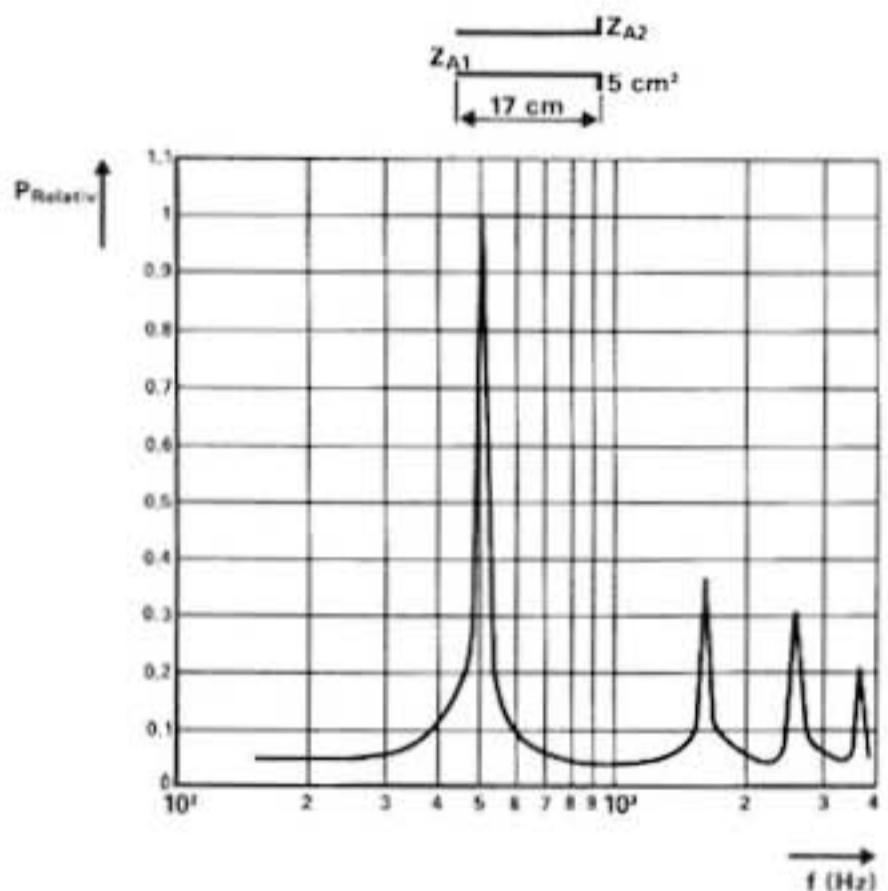
$$f_{\text{box}} = \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{S_v}{L_v \cdot V_{\text{box}}}}$$

Auch eine einfach in eine Gehäusewand gesägte Öffnung hat daher eine größere Tunnellänge als die Gehäusewandstärke zur Folge; das wird oft übersehen.

Es kann vorkommen, daß der benötigte Tunnel sehr lang sein muß. Dieser Fall tritt meist dann

ein, wenn kleine Gehäuse auf tiefe Frequenzen abgestimmt werden. Hierbei kann ein abgewinkelter Tunnel recht nützlich sein. Aber Vorsicht: Ein Baßreflextunnel kann auch andere Frequenzen übertragen. Ein Rohr, das an beiden Seiten offen ist, schwingt mit einer Resonanzfrequenz, deren Wellenlänge gleich der doppelten Rohrlänge ist; außerdem schwingt es noch auf einigen Oberwellen der Resonanz. Ein ähnlicher Effekt wird im Lautsprecherbau auch zur wirkungsvollen Wiedergabe tiefer Frequenzen genutzt: der Transmission-Line Effekt. Die Kurve in Bild 5.11 zeigt die ausgeprägten Eigenresonanzen eines Baßreflextunnels.

11



86902-5-11

Bild 5.11. Ein beidseitig offenes Rohr (Baßreflextunnel) weist einige ausgeprägte Eigenresonanzen auf. Dieser Effekt kann zu einer störenden Klangverfärbung im Mitteltonbereich führen, wenn diese Frequenzen durch Musiksignale oder Modulationsprodukte angeregt werden.

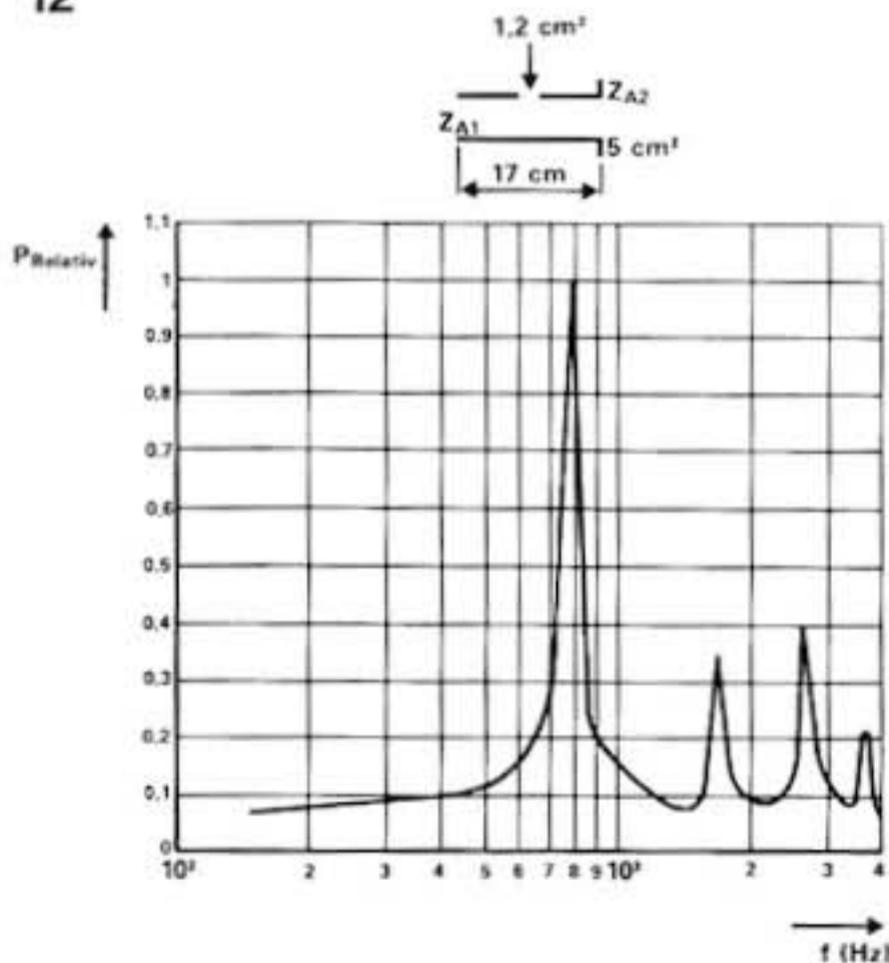
Achtung bei Messungen: Nur Rauschsignal verwenden und Abstand halten. An den Rohrenden befindet sich ein Schnellmaximum der Luftmoleküle. Das verursacht bei normalen Mikrofonen, die als Druckempfänger arbeiten, grobe Meßfehler.

Alle diese Schwingungen werden direkt oder durch Differenztöne im Gehäuse angeregt. (Sie sind also bei Messungen mit sinusförmigen Signalen nicht immer direkt feststellbar.) Bei einem 40 cm Tunnel geschieht das z.B. so um die 400 Hz. Auch kann die Oberwelle bei 1200 Hz in einer 2-Wege Box noch gut angeregt werden. Das klangliche Ergebnis dieser Resonanzen ist eine oft deutlich verfärbte Wiedergabe und kein rechter Hifi-Genuß.

Bevor Sie jetzt einen durchlöchernten Baßreflex-tunnel einsetzen, wie es lustigerweise vor einiger Zeit vorgeschlagen wurde, werfen Sie einen Blick auf das Ergebnis einer solchen Operation in Bild 5.12. Das Loch verursacht noch mehr Störgeräusche, deshalb sollte man diesen Vorschlag wieder schleunigst vergessen.

Wird ein solcher gelochter Tunnel als Baßreflex-tunnel in einem Lautsprechergehäuse eingesetzt, dann muß er die doppelte Länge eines normalen Baßreflex-tunnels haben, damit die richtige Resonanzfrequenz eingestellt wird. Multiplizieren Sie die Frequenzen im Diagramm einfach mit dem Faktor 2 (für die doppelte Tunnellänge), dann haben Sie den

12



86902-5-12

Bild 5.12. Ein Baßreflex-tunnel mit einem Loch in der Mitte verursacht noch mehr Störgeräusche als ein normales Rohr.

direkten Vergleich zwischen der Mitteltonwiedergabe beider Tunnel. Eine Passivmembran leistet bessere Dienste. Sie ersetzt die Luftmasse im Tunnel, kann aber auch bei höheren Frequenzen resonanzarm gehalten werden. Diese Passivmembranen sind käuflich zu erwerben. Sie lassen sich aber auch aus defekten Chassis selbst herstellen, da eine Passivmembran einfach ein Chassis ohne Magnet ist. Voraussetzung ist allerdings eine sehr nachgiebige Membranaufhängung mit geringer innerer Reibung. Die Membran sollte bei tieferen Frequenzen keine Resonanzen zeigen, daher sind die Passivmembranen oft aus Styropor gefertigt. Da es Styropor auch in Platten zu kaufen gibt, können Sie sich auch selbst behelfen. Dazu ein Vorschlag in Bild 5.13.

13

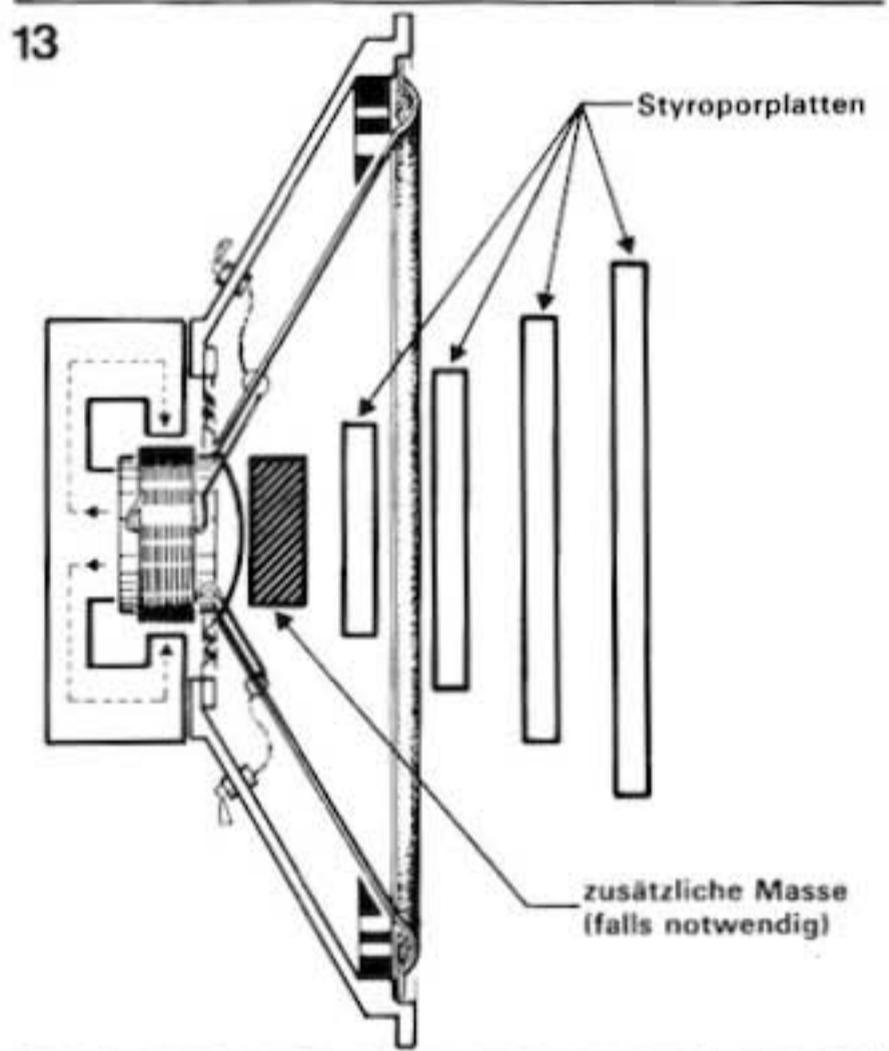


Bild 5.13. Eine Passivmembran ist im Prinzip ein Lautsprecherchassis ohne Magnet und ohne Schwingspule. Die Membran muß bei tiefen Frequenzen resonanzfrei sein. Mit preiswerten Chassis läßt sich diese Forderung einfach realisieren: Man klebt runde Styroporplatten auf die Papiermembran. Achten Sie beim Befestigen von Zusatzgewichten immer darauf, daß die Membran durch die veränderte Schwerpunktlage nicht verkantet, da ansonsten die Membran nicht mehr linear arbeitet.

Die nötigen Chassiskörbe mit Papiermembranen gibt es recht preiswert bei kleineren Chassisherstellern. Die Vergrößerung der bewegten Masse ist hier kein Handicap, sondern ein Vorteil. Um die Reibungsverluste gering zu halten, sollte die Passivmembran größer als die antreibende Membran sein (das reduziert die nötige Auslenkung und damit die Reibung in der Membranaufhängung); es genügt die 1,5- bis 2-fache Fläche. Die größere Fläche erfordert viel Masse, wenn sie im gleichen Gehäuse auf eine niedrige Frequenz abgestimmt werden soll; das ist, wie bereits gesagt, in diesem Fall vorteilhaft. Für Q_p gilt das gleiche wie für Q_m oder Q_l . Sie zeigen den Einfluß bedämpfender Widerstände oder Verluste, ganz wie Sie es sehen wollen, die die Rechnung kompliziert machen. Je größer diese Werte für Q_l , Q_m und Q_p sind, um so mehr Korrekturen der berechneten Werte sind später erforderlich.

$$Q_p = \frac{2\pi \cdot f_p \cdot M_{mp}}{R_{mp}}$$

Der Vorteil einer großen Masse M_p der Passivmembran ist also nicht zu übersehen, wenn es um möglichst hohe Werte für Q_p geht.

Mancher Leser wird durch die hohe Masse jetzt vielleicht eine Verschlechterung des Impulsverhaltens befürchten. Nur, um ein Baßreflexgehäuse mit einer Luftmasse im Tunnel auf die gleiche Resonanzfrequenz abzustimmen, wird die gleiche Masse (genauer Massenträgheit) benötigt, wie bei der Passivmembran. Es ändert sich also gar nichts.

Das richtige Gewicht der Passivmembran wird wie die richtige Länge eines Reflextunnels ermittelt: nach den überschlägigen Kalkulationen durch genaue Messungen. Bei einer Impedanzmessung finden wir die Frequenzen f_l , f_m und f_h . Die Impedanzkurve einer Baßreflexbox zeigt in dem typischen Verlauf (Bild 5.1) bei tiefen Frequenzen zwei Maxima und in der Mitte dazwischen ein Minimum. Dabei sind f_l und f_h die Frequenzen, bei denen wir maximale Werte messen. Die Frequenz f_m liegt in der geometrischen Mitte zwischen f_l und f_h ; dort hat die Impedanz auch ihr Minimum. Es ist jetzt:

$$f_{\text{box}} = \sqrt{f_l^2 + f_h^2 - f_m^2}$$

Zur Kontrolle von f_m kann man die Passivmembran blockieren; jetzt müßte bei f_m ein Maximum der Impedanz meßbar sein. Liegt diese Frequenz über dem Wert in der Tabelle,

muß mehr Masse her oder der Tunnel länger werden. (Jede Verdopplung der bewegten Masse oder der Tunnellänge ändert f_{box} um den Kehrwert der Wurzel 2.)

Bei preiswerteren Chassis kann einem hier der Spaß an der Sache vergehen. Es ist allerdings alles einfacher, wenn die Ergebnisse nicht aufs Prozent stimmen sollen. Berücksichtigen wir Änderungen von Luftdruck und Temperatur, so fallen einige Stellen hinter dem Komma als unwichtig aus der Rechnung. Auch mit den folgenden Diagrammen und Gleichungen ist eine Annäherung möglich.

Mit den Werten für V_{as} , Q_{ts} und f_s lassen sich folgende Werte ermitteln: $V_{\text{as}} \cdot Q_{\text{ts}}^2$ sowie der Quotient aus f_s und Q_{ts} . Die einzelnen Werte müssen allerdings mit ausreichender Genauigkeit vorliegen; ansonsten lieber nachmessen. Für die untere Grenzfrequenz von Baßreflexboxen gilt jetzt mit ausreichender Genauigkeit:

a) ohne Verlustfaktor ($Q_l = \infty$)

$$f_{-3 \text{ dB}} = 0,84 \sqrt{\frac{V_{\text{as}} \cdot f_s^2}{V_{\text{box}}}}$$

b) realistischer mit Verlustfaktor ($Q_l = 7$)

$$f_{-3 \text{ dB}} = 1,00 \sqrt{\frac{V_{\text{as}} \cdot f_s^2}{V_{\text{box}}}}$$

Das Gehäuse muß in allen Fällen auf die folgende Frequenz abgestimmt werden:

$$f_{\text{box}} = 0,39 \frac{f_s}{Q_{\text{ts}}}$$

Die Diagramme in Bild 5.14 zeigen den Verlauf der Schalldruckkurven für verschiedene Kombinationen von f_s und Q_{ts} . Das Volumen V_{box} wird hierbei der Einfachheit halber durch ein Vielfaches des Produktes aus V_{as} und Q_{ts}^2 angegeben. Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, daß Sie hier nicht nur eine -3 dB Frequenz errechnen, sondern gleichzeitig auch den Verlauf der Wiedergabekurve in der Umgebung der Resonanzfrequenz sehen können. Alle Kurven beziehen sich dabei auf eine halbkugelförmige Abstrahlung der Lautsprecherbox (Freifeldmessung). Für die Aufstellung der Boxen im Wohnraum gilt natürlich das gleiche wie für geschlossene Boxen. Die Einflüsse der Raumwände sollten berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang sind unerwartete Baßreflexabstimmungen interessant, bei de-

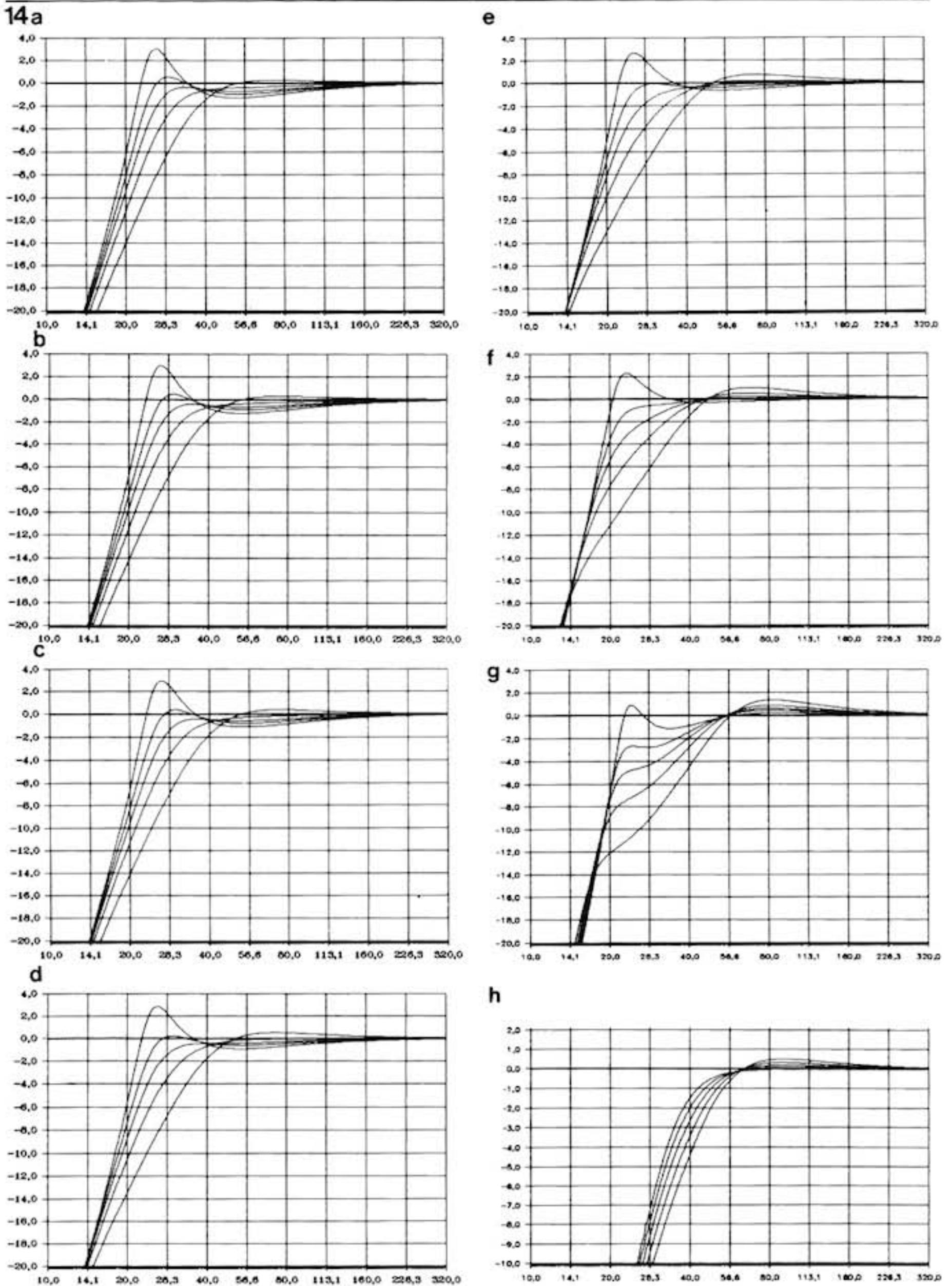


Bild 5.14a bis 5.14g. Die Kurven in den Diagrammen a...g ermöglichen eine sehr gute Vorhersage der Schalldruckkurven von Baßreflexboxen unter Freifeldbedingungen. Auf der vertikalen Achse ist der Schalldruckpegel in dB und auf der horizontalen Achse ist die Frequenz in Hz aufgetragen. Jedes Diagramm zeigt fünf Kurven, die ein Vielfaches vom Gehäusevolumen $V_{\text{box}} = V_{\text{as}} \cdot Q_{\text{ts}}^2$ darstellen; die Faktoren sind 2,5, 4,0, 5,7, 8,0 und 16,0. Das Gehäuse mit der Baßreflexöffnung ist auf die übliche Frequenz abgestimmt ($f_{\text{box}} = 0,39 \cdot f_s / Q_{\text{ts}}$). Es ist deutlich zu erkennen, wie die Kurven bei Chassis mit höheren Q_{ts} -Wert und einem Gehäusevolumen von $V_{\text{box}} = 4 \cdot V_{\text{as}} \cdot Q_{\text{ts}}^2$ zuerst flach abfällt. Erst etwa eine Oktave unter der Resonanzfrequenz des Gehäuses nimmt die Kurve den für Baßreflexboxen typischen Verlauf an. Dieses Verhalten verringert oft Probleme mit der richtigen Aufstellung solcher Boxen.

Für die Kurven gelten folgende Q_{ts} -Werte: Diagramm a = 0,16; Diagramm b = 0,2; Diagramm c = 0,25; Diagramm d = 0,32; Diagramm e = 0,4; Diagramm f = 0,5 und Diagramm g = 0,68. In den Diagrammen entspricht die linke Kurve dem Gehäusevolumen mit dem höchsten Faktor, die Kurve rechts gilt für den niedrigsten Faktor.

Bild 5.14h bis 5.14n. Die Diagramme zeigen den Einfluß von Fehlern auf den Schalldruckpegel von Baßreflexboxen. Auf der vertikalen Achse ist der Schalldruck in dB aufgetragen; auf der horizontalen Achse die Frequenz in Hz. Alle Fehlerkurven haben einen relativen Bezug zur 0%-Fehlerkurve, deren Wert bei der Berechnung jeweils willkürlich angesetzt wurde. In den Diagrammen hat die 0%-Fehlerkurve den linearsten Verlauf.

Bild 5.14h. Die Kurven zeigen, daß bei einem zu großen Gehäuse der Fehler noch relativ gering ist. Das Gehäuse ist für die abgebildeten Kurven 0, 10, 20 40 und 80% zu groß.

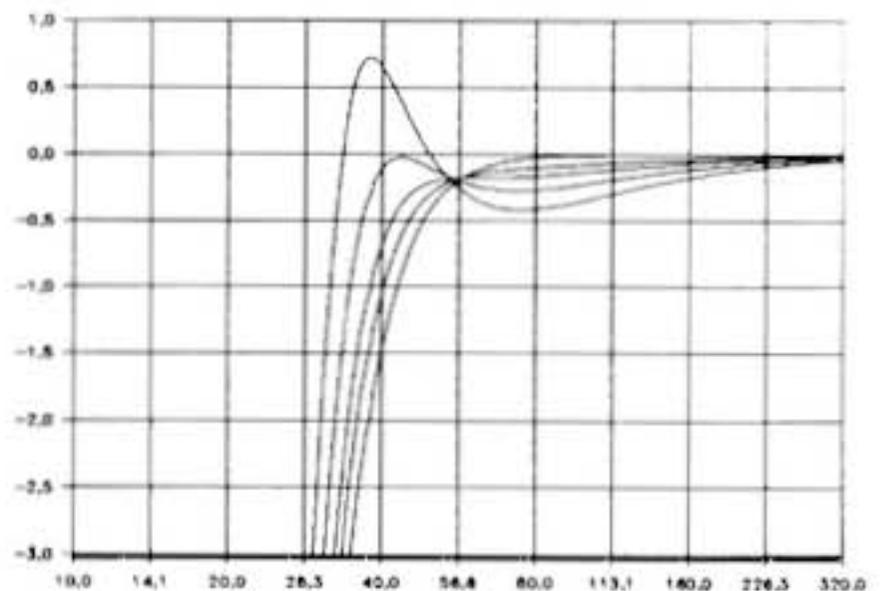
Bild 5.14i. Das ist der typische Schalldruckpegelverlauf für zu kleine Gehäuse (0, 10, 20, 30 und 40%). Bei 40% ist die

nen Chassis mit einem Q_{ts} von 0,5 bis 0,6 in Gehäusen mit

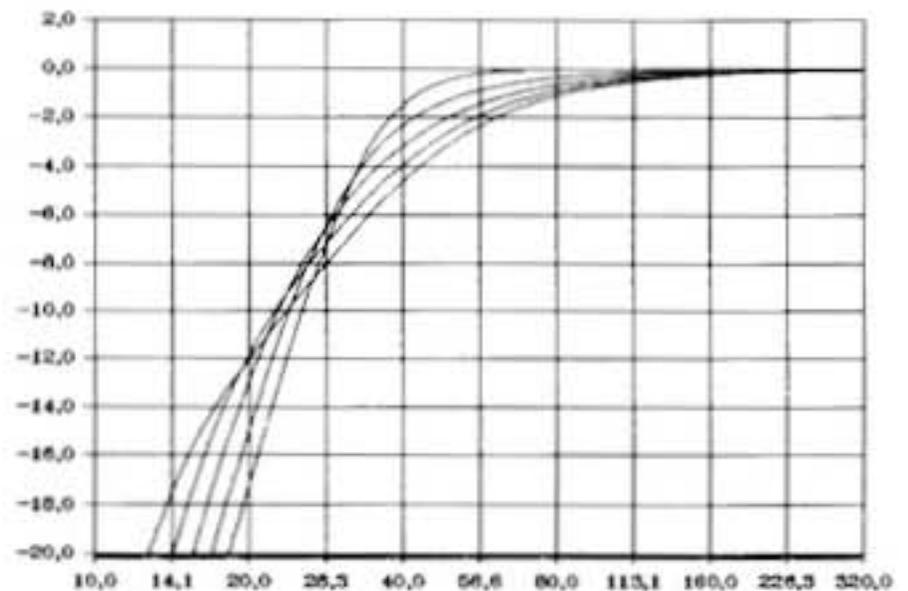
$$V_{\text{box}} = 4 \cdot V_{\text{as}} \cdot Q_{\text{ts}}^2$$

einen Schalldruckverlauf liefern, der den geschlossenen Boxen mit einem Q_{tc} von 0,5 recht ähnlich ist. Chassis mit vergleichsweise hohem Q_{ts} , die aus diesem Grund immer für geschlossene Gehäuse empfohlen werden, sind auch offensichtlich in Baßreflexgehäusen sehr gut aufgehoben!

14i



14k



Schalldrucküberhöhung doch schon enorm.

Bild 5.14j. Diese Kurven zeigen den Einfluß einer zu hoch abgestimmten Gehäuseresonanz (0, 10, 20, 40 und 80%).

Neben dem problemlosen Aufstellen solcher Boxen in normalen Räumen bietet sich hier die Möglichkeit, etwas mit der unteren Grenzfrequenz des Raumes zu experimentieren. Betreiben Sie die Box wahlweise als geschlossenes System oder als Baßreflexbox.

Das folgende Beispiel verwendet ein sehr gutes und preiswertes 20 cm Chassis, AUDAX HIF 20 HS, mit folgenden Daten:
 Flußdichte im Luftspalt = 1,53 T
 Resonanzfrequenz = 25 Hz

14j

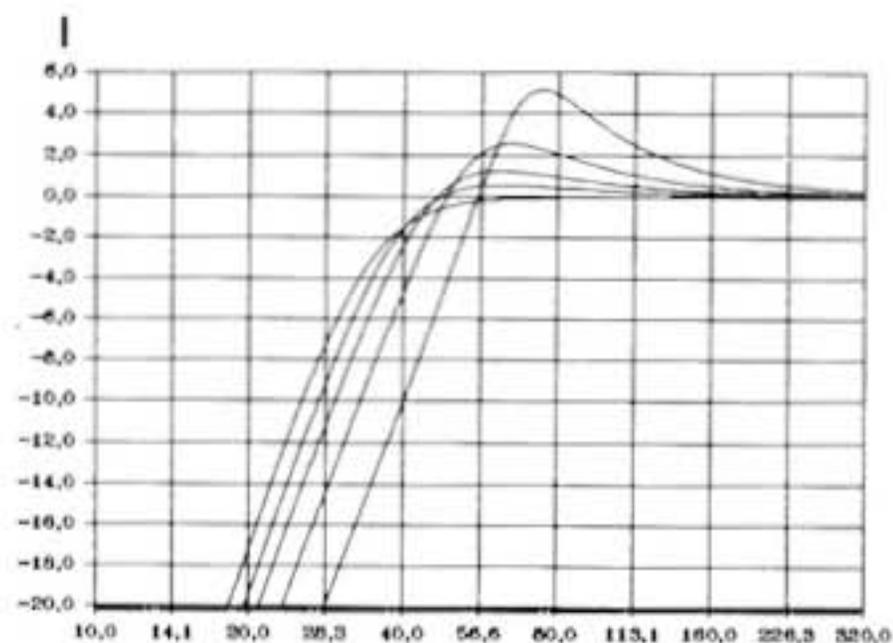
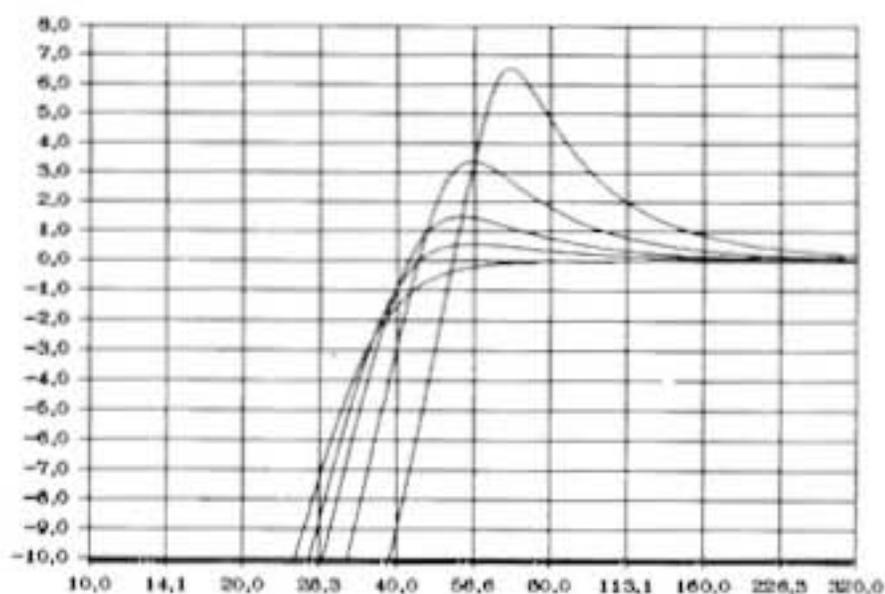


Bild 5.14k. Die Kurven zeigen den Einfluß einer zu niedrig abgestimmten Gehäuseresonanz (0, 10, 20, 30 und 40%).

Bild 5.14l. In diesem Beispiel gibt es gleich mehrere Fehler. Das Gehäusevolumen ist um 0, 10, 20, 30 und 40% zu klein und die Resonanzfrequenz 0, 10, 20, 40 und 80% zu hoch.

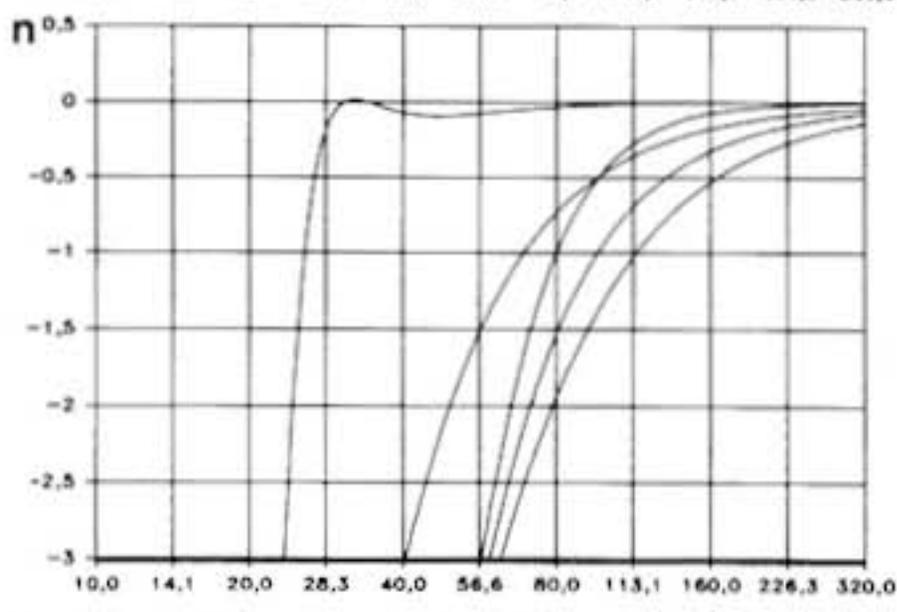
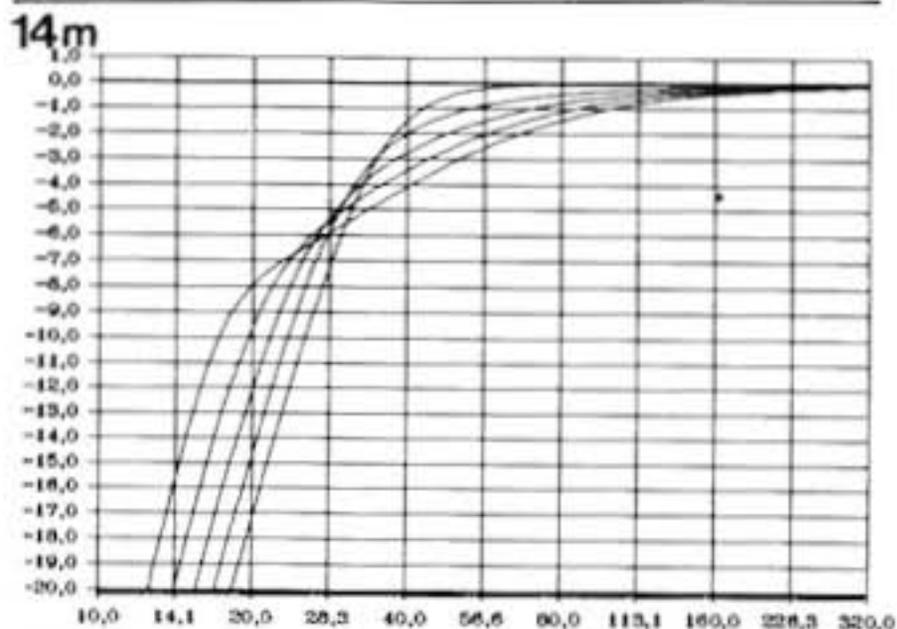


Bild 5.14m. Auch hier sind zwei Fehler gleichzeitig die Ursache für die Nichtlinearität. Das Gehäusevolumen ist zu groß (0, 10, 20, 40 und 80%) und die Resonanzfrequenz ist zu niedrig (0, 10, 20, 30 und 40%).

Bild 5.14n. Die Kurven zeigen den unterschiedlichen Schalldruck für ein Chassis ($f_s = 30$ Hz, $Q_{ts} = 0,37$, $V_{as} = 100$ l) bei unterschiedlichen Gehäusen.

1. Geschlossene Box mit 120 l Volumen, einer Resonanzfrequenz von 40,5 Hz und einer Gesamtgüte von 0,50.
2. Geschlossene Box mit 56 l Volumen, einer Resonanzfrequenz von 50 Hz und einer Gesamtgüte von 0,61.
3. Geschlossene Box mit 38 l Volumen, einer Resonanzfrequenz von 57 Hz und einer Gesamtgüte von 0,71.
4. Passive Baßreflexbox mit 67 l Volumen und einer Resonanzfrequenz von 32,4 Hz.
5. Aktive Baßreflexbox mit 56 l Volumen und einer Resonanzfrequenz von 24 Hz. Diese Box benötigt noch ein externes Hochpaßfilter (2ter Ordnung).

Gesamtgüte $Q_{ts} = 0,46$

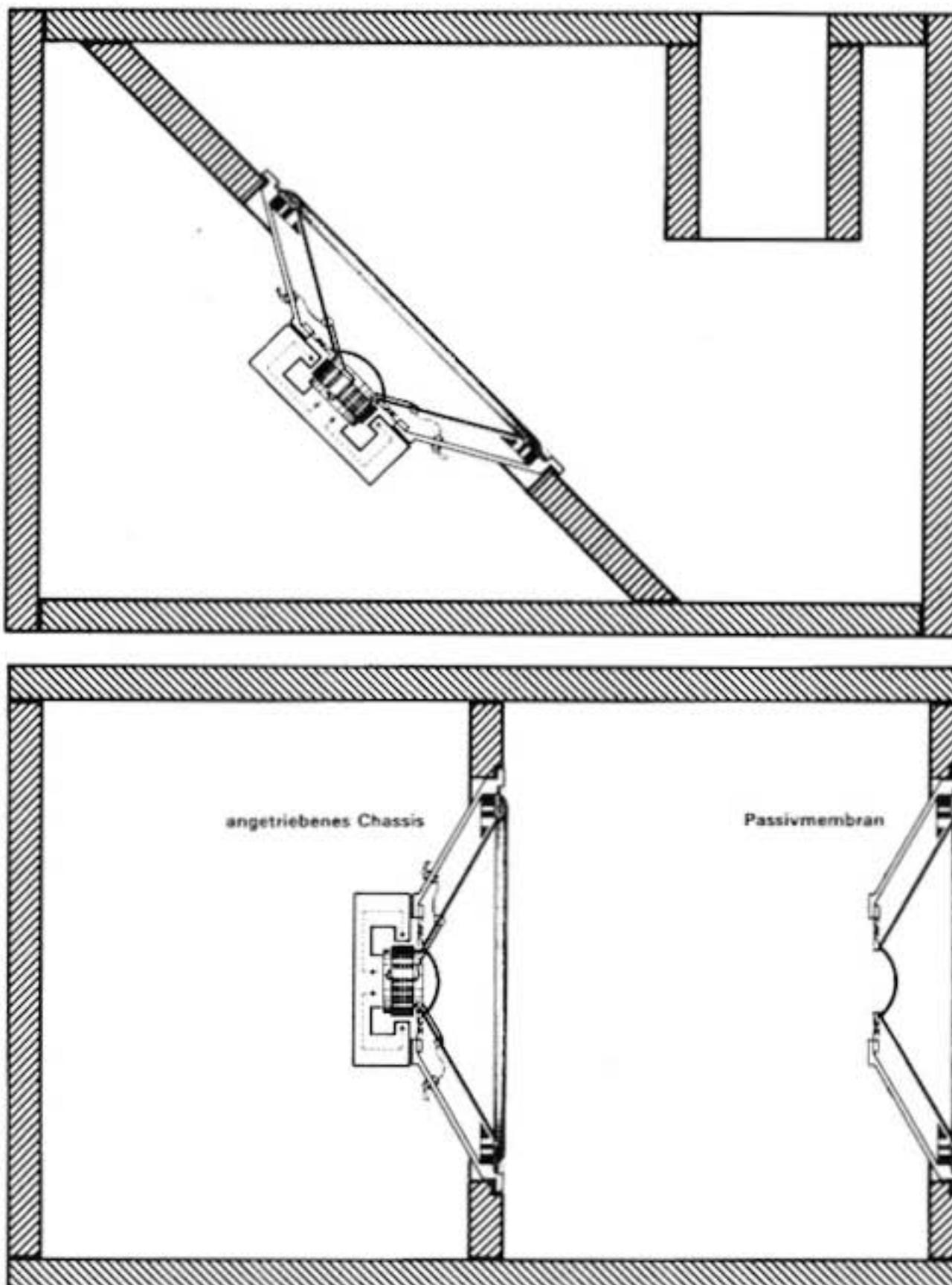
Vergleichsvolumen $V_{as} = 0,12 \text{ m}^3$

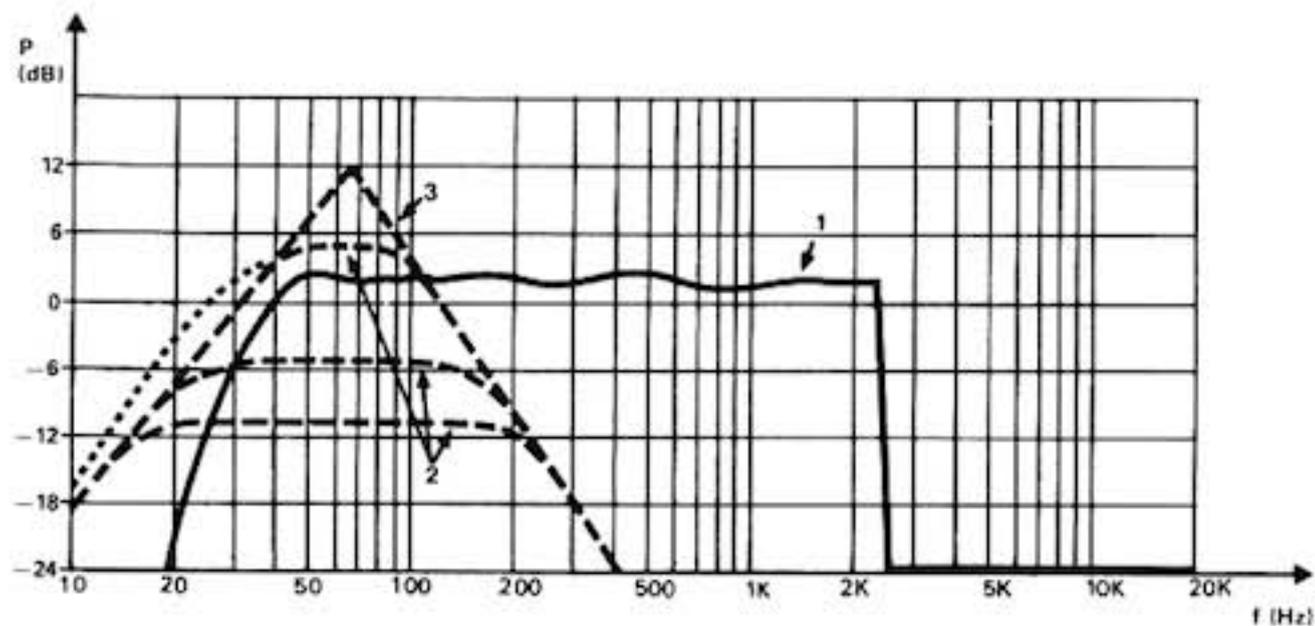
Beim Einbau in ein geschlossenes Gehäuse mit ca. 120 l Volumen ergibt sich eine Resonanzfrequenz um 33 Hz; der Q_{tc} -Wert liegt bei ca. 0,7. Wird das Gehäuse jetzt mit einer Baßreflexöffnung versehen, können Sie diese auf

ca. 19 Hz abstimmen und einmal hören, wie die Box klingt. Wenn das Ergebnis unbefriedigend ist, wird die Öffnung einfach wieder verschlossen. Sie können so für sehr viele verschiedene Räume jeweils die richtige Abstimmung für geschlossene Gehäuse realisieren und diese dann durch eine Baßreflexöffnung auf Frequenzen unterhalb der untersten Raumresonanzfrequenz abstimmen. Bei größeren Räumen läßt sich eine geschlossene Box mit $Q_{tc} = 0,5$ von vorneherein durch eine Baßreflexversion mit entsprechend verringerter Membranauslenkung ersetzen. (Vorsicht: bei hochabgestimmten Baßreflexboxen kön-

Bild 5.15a. Statt einer Passivmembran kann man natürlich auch ein Baßreflex-tunnel einsetzen. Es besteht dann allerdings wieder die Gefahr störender Tunnelresonanzen.

15 a





86902-5-15b

Bild 5.15b. Verschiedene Schalldruckkurven.

1. Chassis in einem Baßreflexgehäuse
2. Kurven für verschiedene Bandpaßabstimmungen
3. Chassis mit vorgeschaltetem Kondensator

nen tieffrequente Signale erheblichen Sachschaden anrichten!)

Berücksichtigen Sie bei allen Kalkulationen die extrem geringe Belastbarkeit der Baßreflexboxen bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz. Es kann oft sinnvoller sein, eine Box eher etwas zu tief abzustimmen als zu hoch. Zwar verschlechtert eine nicht ganz optimale Abstimmung das Impulsverhalten, doch riskieren Sie bei optimaler Abstimmung nach den verschiedenen Tabellen für Baßreflexboxen oft auch eine permanente Gefährdung des Chassis. Eine Übersicht über die Amplitudenstatistik durchschnittlicher Musikstücke folgt weiter hinten.

Es leider nicht möglich, hier die Vielzahl der Möglichkeiten durch Beispiele zu demonstrieren, aber mit Hilfe der Diagramme aus Bild 5.14 finden Sie sich sicher zurecht. Genau wie bei der Konstruktion von Lautsprecherboxen können Sie die Diagramme nutzen, um vorhandene Lautsprecherboxen etwas umzubauen. So können Sie z.B. eine vorhandene kleine Baßreflexbox durch ein etwas vergrößertes Volumen (einen fest montierten Sockel) und eine tiefere Abstimmung häufig zu einer deutlich besseren Baßwiedergabe verhelfen. Eine Variante der Baßreflexboxen ist auch der Bandpaßlautsprecher. Obwohl die Idee im Zeitalter der Aktivboxen an Bedeutung ver-

liert, darf sie der Vollständigkeit halber in diesem Buch nicht fehlen. Wird bei einer Baßreflexbox das Chassis auf der Vorderseite durch ein geschlossenes Gehäuse an der Schallabstrahlung gehindert (Bild 5.15), kann nur aus der Baßreflexöffnung (oder Passivmembran) Schall abgestrahlt werden.

Beim Einsatz in passiven Boxen bietet diese Anordnung einige Vorteile. Den Wirkungsgrad des Chassis bestimmt nicht mehr die Massenträgheit im Mitteltonbereich. Auf die Wiedergabe dieses Bereiches wird ja bewußt verzichtet, daher kann der Wirkungsgrad (in dB/1W/1m) des Bandpaßlautsprechers deutlich höher liegen als der, mit dem das Chassis verkauft wird. Zum anderen ist bereits eine 12 dB Frequenzweiche eingebaut, was die Kosten für die nötigen Bauteile passiver Frequenzweichen bei tiefen Übernahmefrequenzen drastisch verringert. Dieses Konzept eignet sich damit sehr gut für passive Subwoofer. Nachteilig ist hier leider die direkte Abhängigkeit von Schalldruck und Bandbreite zu den Chassisparametern B_l , M_{md} und C_{ms} . Die Folge hiervon ist, daß die Berechnungen oft mit dem frustrierenden Ergebnis abgeschlossen werden, daß das benötigte Chassis natürlich wieder nirgendwo im Handel erhältlich ist. Als Selbstbau-Fan ist man deshalb mit aktiven Lösungen besser bedient.

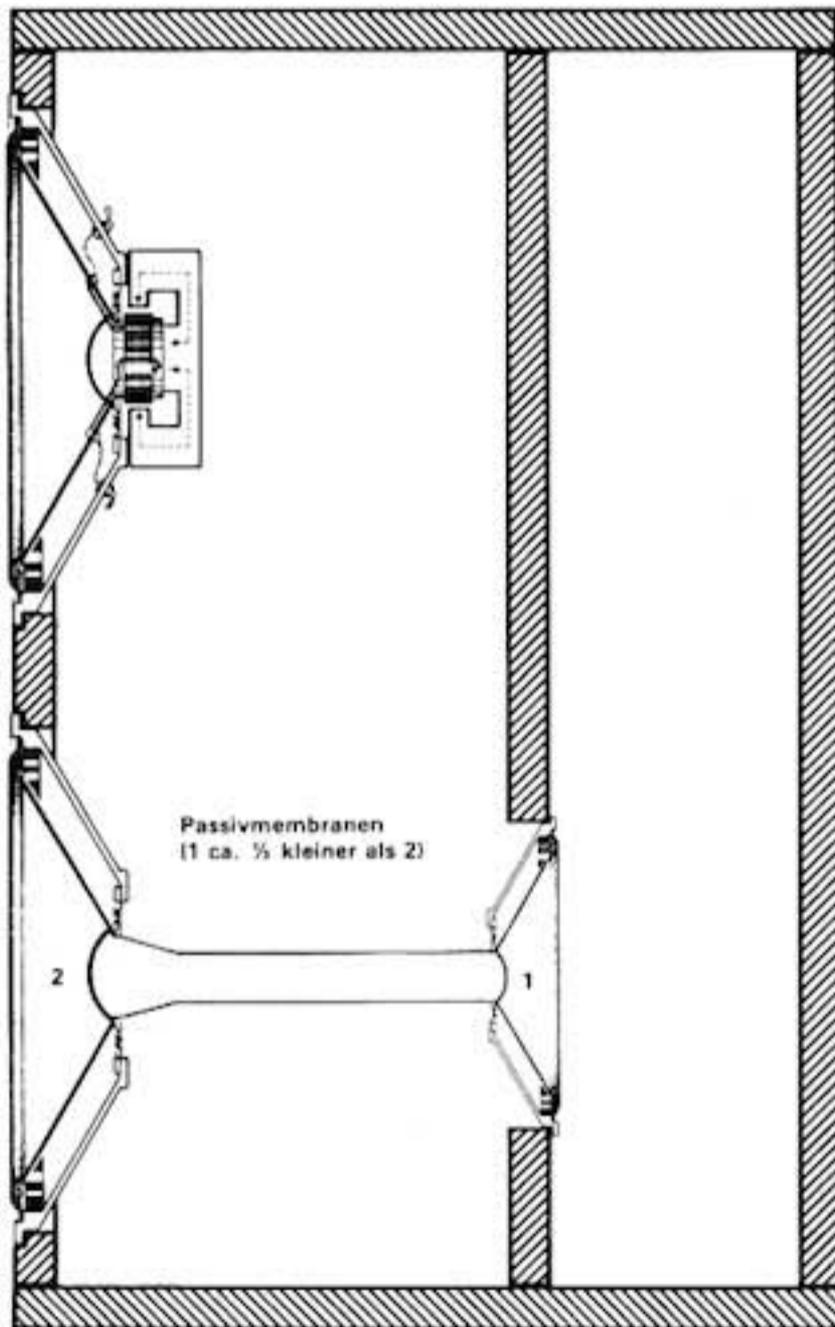
Ein interessanter Aspekt dieser Konstruktion ist das eingebaute Subsonicfilter aus bewegter Masse der Membranen und dem Luftvolumen hinter dem eingebauten Lautsprecherchassis. In Verbindung mit einem vorgeschalteten Kondensator wird eine Steilheit von ca. 18 dB/Oktave realisiert. Das geschlossene Gehäuse

schützt die Membran wirkungsvoll vor großen Auslenkungen und kann auch alten Chassis mit ausgeleierter Membranaufhängung wieder zu gewünschter Federsteife verhelfen bzw. genau dieses Ausleieren verhindern. Damit ergeben sich bei rauhem Einsatz z.B. in Discothekenanlagen einige Vorteile gegenüber konventionellen Baßreflexboxen.

Es gibt auch eine andere Lösung. Sie ist in Bild 5.16 abgebildet.

Bei diesem System ist eine doppelte Passivmembran eingesetzt. Die Erklärung hierzu mit den ausführlichen Berechnungsgrundlagen gehen jedoch weit über den Rahmen dieses Buches hinaus. Deshalb ist diese Lösung nur im Bild dargestellt.

16



Jede Überlegung schließt beim Boxenbau mit der Frage: Steht der Aufwand in Relation zum Ergebnis? Auch bei optimierter Abstimmung gewinnt man bei passiven Baßreflexboxen mit Mühe und Not gerade eine um 1/3 Oktave nach unten verlagerte Grenzfrequenz; das sind knapp 3 dB. Das ist nicht viel. Besser sind doch sicherlich 30 dB mehr; versuchen wir es. Als Beispiel dient ein JBL Baßchassis K 140 mit folgenden Daten:

$$f_s = 30 \text{ Hz}$$

$$Q_{ts} = 0,21$$

$$V_{as} = 300 \text{ l}$$

$$V_d = 450 \text{ cm}^3$$

$$R_{dc} = 5,5 \text{ Ohm}$$

$$Bl = 19,1 \text{ Tm}$$

$$M_{md} = 0,104 \text{ kg}$$

$$C_{ms} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/N}$$

$$S_d = 0,089 \text{ m}^2$$

Eine Baßreflexabstimmung mit Butterworth-Charakteristik würde mit den nun bereits bekannten Tabellen folgendes Ergebnis bringen: $V_{box} = 35 \text{ l}$; $f_{-3 \text{ dB}} = 75 \text{ Hz}$ und $f_{box} = 56 \text{ Hz}$

Das ist nicht gerade umwerfend. Mit einer aktiv entzerrten Baßreflexkonstruktion ist ein besseres Ergebnis möglich:

$V_{box} = 53 \text{ l}$ und $f_{-3 \text{ dB}} = f_{box} = f_{aux} = 42 \text{ Hz}$
 f_{aux} = Resonanzfrequenz des vorgeschalteten aktiven Filters

Hier bewirkt ein aktives Filter vor dem Endverstärker eine Anhebung der zugeführten Leistung bei der Frequenz f_{aux} um den Faktor 2,0. Damit kann man die Box tiefer abstimmen, ohne auf die Butterworth-Charakteristik zu verzichten. Ähnlich, wie bei den geschlossenen Boxen 6ter Ordnung konstruieren wir hier eine Baßreflexbox 6ter Ordnung.

Das ist noch nicht zufriedenstellend. Bei dem gewählten Chassis, es ist sehr robust, ist ein -3 dB Punkt unter 20 Hz vertretbar. Die entsprechenden Kurven sind hierzu in Bild 5.17 zu sehen.

Wir könnten die Verringerung der -3 dB Frequenz um 20 Hz dadurch erreichen, daß wir durch eine vorgeschaltete Entzerrung vor dem Endverstärker die Ausgangsleistung bei tiefen Frequenzen anheben, um die Box neu abstimmen. Das Ergebnis wäre allerdings katastrophal. Erstens wäre die Übertragungsfunktion völlig anders, als bei der Butterworth-Abstimmung, worunter das Impulsverhalten leiden würde. Zweitens müßten wir bei tiefen Frequenzen soviel Leistung zuführen, daß Verstärker und Chassis dauernd überlastet wären.

Bild 5.16. Die Konstruktion Augmented Passive Radiator nach T.L. Clarke arbeitet mit zwei gekoppelten Passivmembranen.

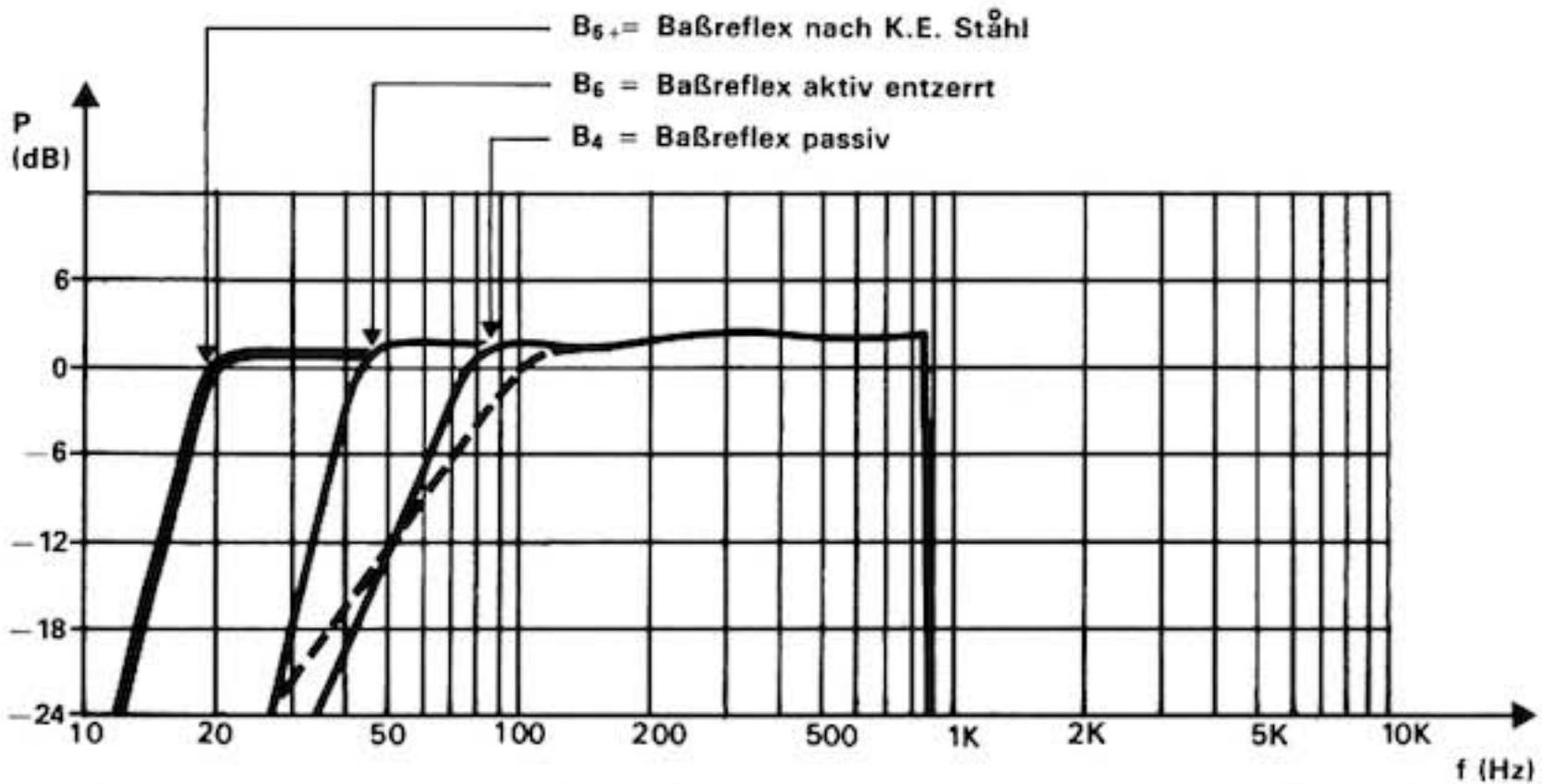


Bild 5.17. Der Kurvenvergleich verdeutlicht die erstaunlichen Möglichkeiten komplexer elektronischer Schaltungen. Eine passive Baßreflexbox würde für den gleichen Wirkungsgrad und die gleiche -3 dB Frequenz ein etwa 16-fach größeres Gehäuse benötigen (ungefähr 1000 l). Zum Vergleich ist im Diagramm auch noch der Schalldruckverlauf für das Chassis in einer geschlossenen Box angegeben (gestrichelt gezeichnet).

Es gibt einen wesentlich besseren Weg, bei dem der Verstärker die mechanischen Parameter bewegte Masse M_{md} , Nachgiebigkeit C_{ms} und Güte Q_{ts} so verändert, daß eine Butterworth-Abstimmung 6ter Ordnung mit der gewünschten -3 dB Frequenz realisiert werden kann. Um das Ziel zu erreichen, ist eine neue bewegte Masse von 470 g (von 104 g) und eine neue Systemdämpfung (R_{mt}) von 198 kg/s (von 94 kg/s) erforderlich. Die neue Systemdämpfung ist nötig, um Q_{ts} trotz der größeren bewegten Masse wieder auf einen geringeren Wert zu bringen. Die alte Systemdämpfung ergibt sich aus der gesamten Reibung des Chassis, d.h. aus elektrischer und mechanischer Bremse:

$$R_{mt} = R_{ms} + \frac{(Bl)^2}{R_{dc}}$$

$$Q_{ts} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{R_{mt}}$$

Das ACE-Prinzip (nach K.E. Stahl) realisiert diese Werte elektronisch, ohne jeden Eingriff in das Chassis. Durch eine Beeinflussung der Ausgangsimpedanz des Verstärkers können die verschiedenen Parameter (bewegte Masse, Federsteife und Dämpfung) unabhängig voneinander variiert werden. Auf diese Weise sind Boxenkonstruktionen möglich, die mit den heute verfügbaren Chassis anders nicht zu realisieren sind. Auch nicht mit dem Feedback-Prinzip der gegengekoppelten Boxen, da z.B. bei Baßreflexboxen kein direkter Zusammenhang zwischen Membranauslenkung und Schalldruck bei verschiedenen Frequenzen besteht. Die Schaltung ist vergleichsweise simpel. Eine Version, bei der alle Parameter unabhängig voneinander einstellbar sind, ist in Bild 5.18 abgebildet.

Die Sache wird einfacher, wenn alle Bauteile bekannt sind (Bild 5.19).

Noch einfacher ist es, wenn auf die Veränderung der Federsteife verzichtet wird (Bild 5.20).

Die Schaltung in Bild 5.20 gilt übrigens für die Baßentzerrung des JBL Chassis.

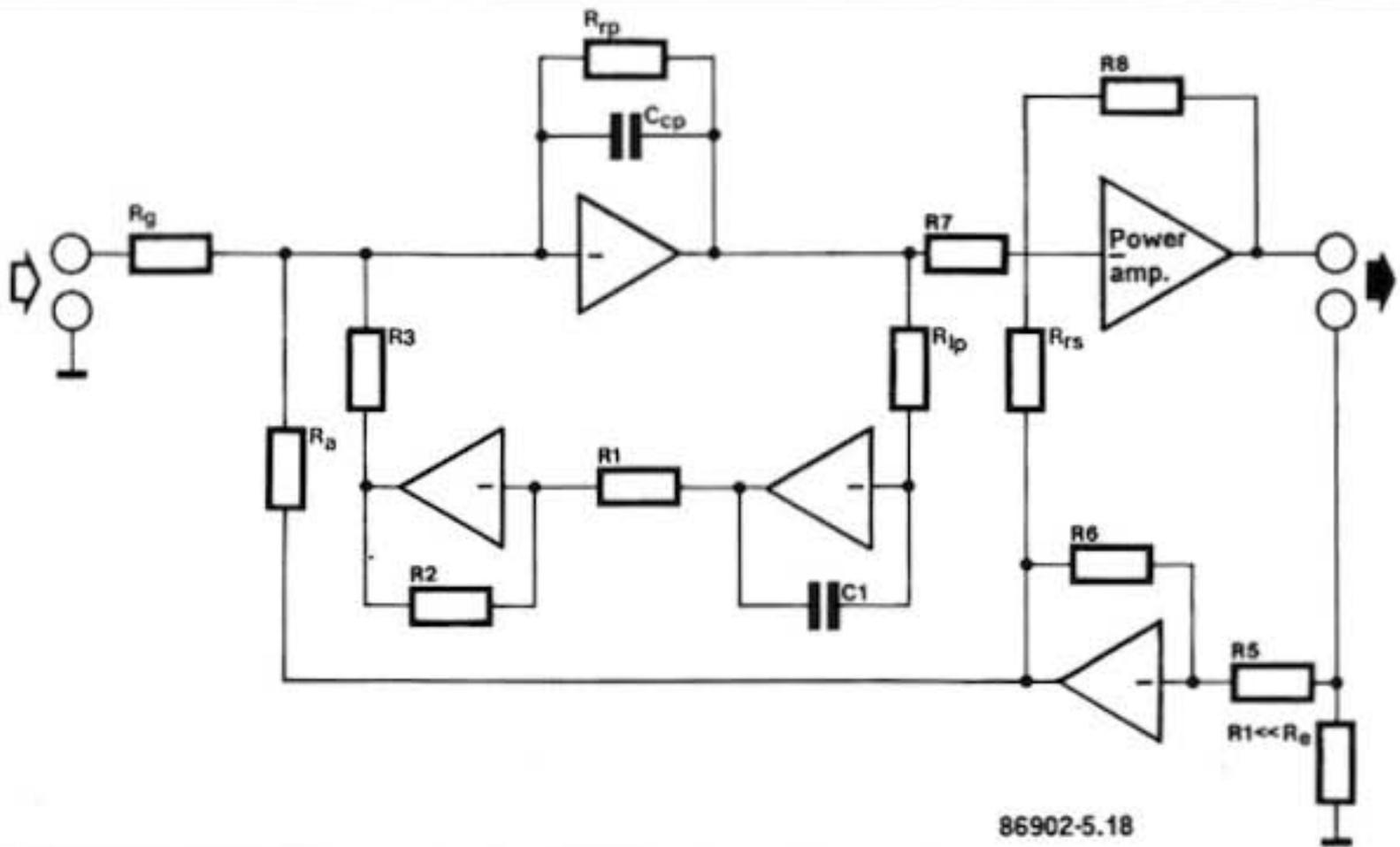
Der Trick bei der Parameterkorrektur der Chassis ist eine komplexe Ausgangsimpedanz des Endverstärkers. Anders als bei einer negativen Ausgangsimpedanz, die nur die Bedämpfung

Bild 5.18.

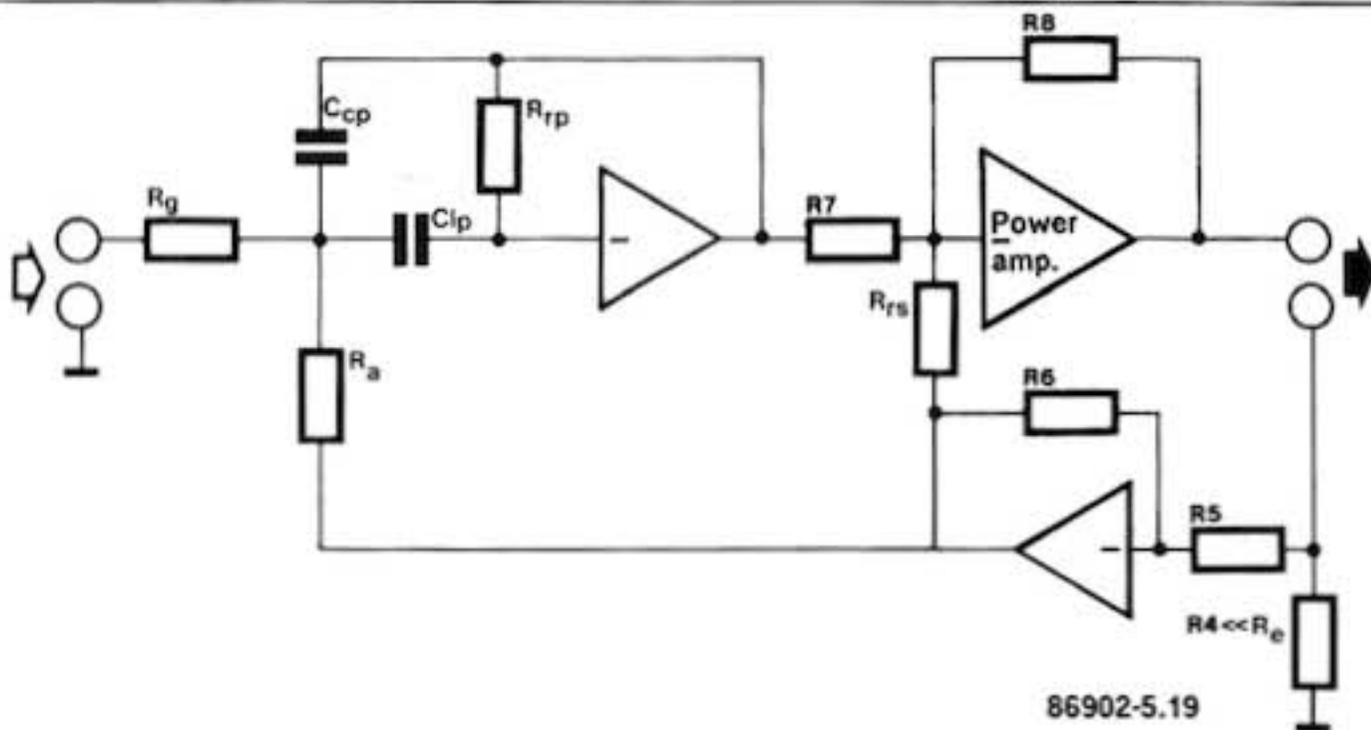
Bild 5.19.

Bild 5.20.

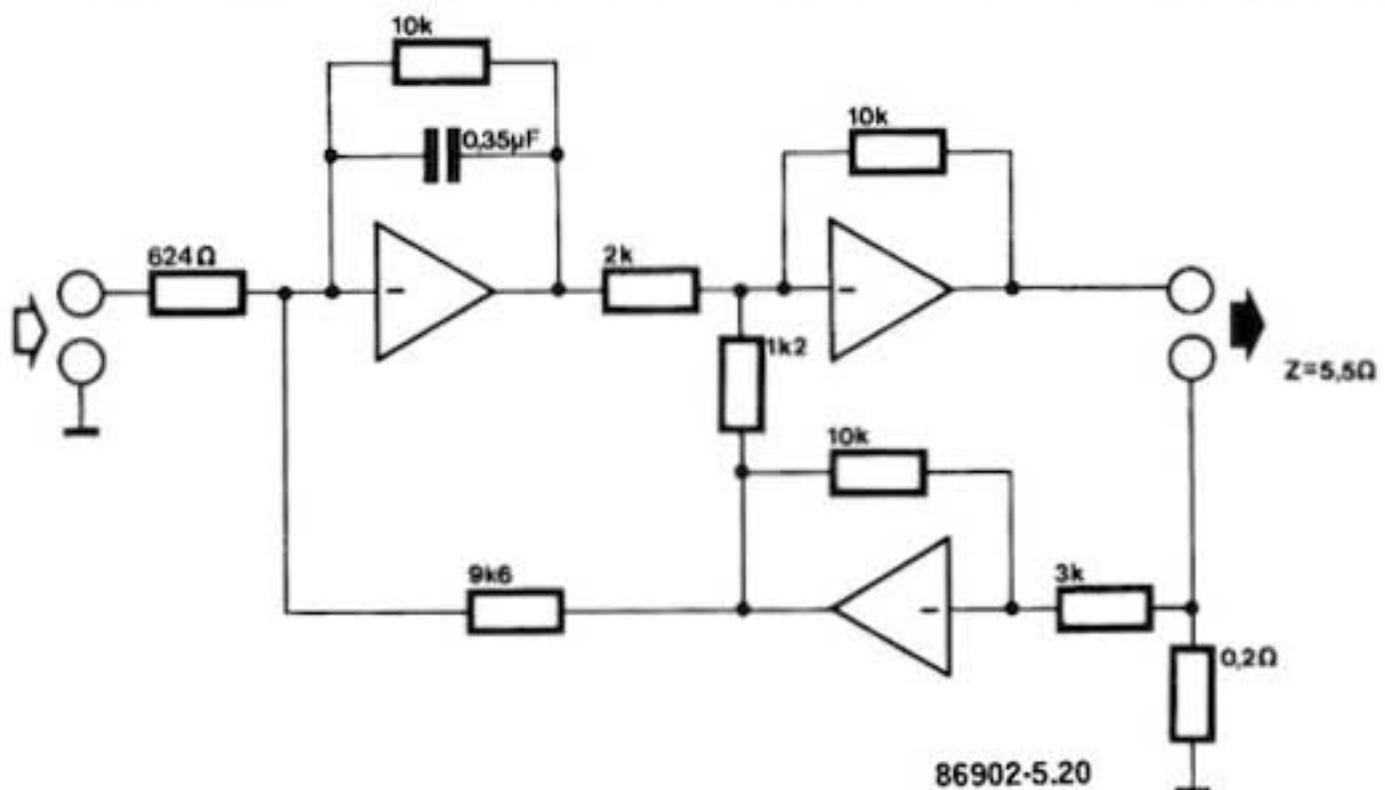
18



19



20



des Chassis verbessert, indem sie den Gleichstromwiderstand der Schwingspule eliminiert, können hier auch die Masse- und Federparameter des Chassis beeinflusst werden.

Die Änderung der Chassisparameter über das vorgeschaltete Filter erfolgt mit den Werten R_s, R_p, C_p, L_p , die in der Schaltung durch die Bauteile R_{rs}, R_{rp}, C_{cp} und R_{lp} (C_{lp}) repräsentiert werden. Berechnen wir zuerst $f_{\text{box}} = f_{-3\text{dB}} = f_{\text{aux}}$ wie bei einer üblichen Abstimmung für eine Baßreflexbox 6ter Ordnung:

$$f_{\text{box}} = 0,3 \frac{f_s}{Q_{ts}}$$

f_{box} = Gehäuseresonanzfrequenz

Es folgt die Berechnung des benötigten Gehäusevolumen V_{box} :

$$V_{\text{box}} = 4,1 V_{\text{as}} \cdot Q_{ts}^2$$

Wir berechnen danach die neue Masse M'_{md} um die gewünschte tiefere Resonanzfrequenz des eingebauten Chassis zu erreichen. Wie üblich erhöht sich hier die Masse im Quadrat zur Verringerung der -3 dB Frequenz. Der Wert für C_p ergibt sich jetzt über M'_{md} :

$$M'_{\text{md}} = M_{\text{md}} + (BI)^2 C_p$$

$$C_p = \frac{M'_{\text{md}} - M_{\text{md}}}{(BI)^2}$$

Um Q_{ts} des Chassis trotz geänderter Masse und Resonanzfrequenz konstant zu halten, muß die Bedämpfung des Chassis geändert werden. Für den neuen Wert R'_{mt} gilt:

$$R'_{\text{mt}} = \sqrt{\frac{M'_{\text{md}}}{C_{ms}}} \cdot Q_{ts}$$

Q_{ts} ist der am Chassis gemessene Wert. Den Wert für R_p errechnen wir jetzt mit dem Wert von R'_{mt} :

$$R'_{\text{mt}} = R_{\text{mt}} + \frac{(BI)^2}{R_p}$$

$$R_p = \frac{(BI)^2}{R'_{\text{mt}} - R_{\text{mt}}}$$

Wenn wir auch die Federsteife des Chassis erhöhen wollen, was bei anderen Abstimmungen nötig werden kann, benötigen wir noch den Wert für L_p :

$$C'_{ms} = \frac{\frac{C_{ms} \cdot L_p}{(BI)^2}}{C_{ms} + \frac{L_p}{(BI)^2}}$$

$$L_p = \frac{(BI)^2}{C_{ms} - C'_{ms}}$$

Für eine neue Nachgiebigkeit C'_{ms} ergibt sich dann ein neuer Wert für R'_{mt} , was zu berücksichtigen ist.

$$Q_{ts} = R'_{\text{mt}} \cdot \frac{\frac{M'_{\text{md}}}{(BI)^2}}{C'_{ms} \cdot (BI)^2}$$

Für das Beispiel mit dem JBL Baß, ohne Änderung der Federsteife, errechnet sich für R_p ein Wert von ca. 3,47 Ohm und für C_p ist der Wert ca. 0,001 Farad. Die folgenden Rechnungen dimensionieren die benötigten Bauteile des Filters. Der Wert für R_s (negative Ausgangsimpedanz eliminiert $R_{dc} = 5,5$ Ohm) ist gleich R_{dc} , also ebenfalls 5,5 Ohm. In der Schaltung ist:

$$R_s = \frac{1}{R_{rs}} \cdot \frac{R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}{R_5}$$

$$R_p = \frac{R_{rp} \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}{R_a \cdot R_5 \cdot R_7}$$

$$C_p = \frac{C_{cp} \cdot R_a \cdot R_5 \cdot R_7}{R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}$$

In der Rechnung für R_p wird deshalb mit R_{rp} gerechnet, weil C_{lp} einen unendlich hohen Wert hat.

Ein anderes Beispiel. Für die Butterworth-Abstimmung 6ter Ordnung eines 38 cm Audax Chassis HD 38 S 100 ergibt sich (Baßreflex 6ter Ordnung):

$$f_{-3\text{dB}} = f_{\text{box}} = f_{\text{aux}} = 37,5 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{box}} = 63 \text{ l}$$

Die Änderung der -3 dB Frequenz auf 20 Hz erfordert eine neue bewegte Masse von 397 g (von 116 g) und eine neue Dämpfung R'_{mt} von 168 kg/s (von 123,3 elektr. und 2,49 mech.). Damit ergibt sich für R_p ein Wert von 1584 Ohm und C_p ist 0,000414 Farad.

In der Schaltung aus Bild 5.18, in der alle Parameter unabhängig voneinander eingestellt werden können, sind:

$$R_s = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}{R_5}$$

$$C_p = \frac{C_{cp} \cdot R_a \cdot R_5 \cdot R_7}{R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}$$

$$R_p = \frac{R_{rp} \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}{R_a \cdot R_5 \cdot R_7}$$

$$L_p = \frac{R_{lp} \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_1}{R_2} \cdot \frac{R_4 \cdot R_6 \cdot R_8}{R_a \cdot R_5 \cdot R_7}$$

$$G = \frac{1}{R_g} \cdot \frac{R_a \cdot R5}{R4 \cdot R6}$$

In der vereinfachten Schaltung Bild 5.19 gilt folgendes:

$$R_s = \frac{1}{R_{rs}} \cdot \frac{R4 \cdot R6 \cdot R8}{R5}$$

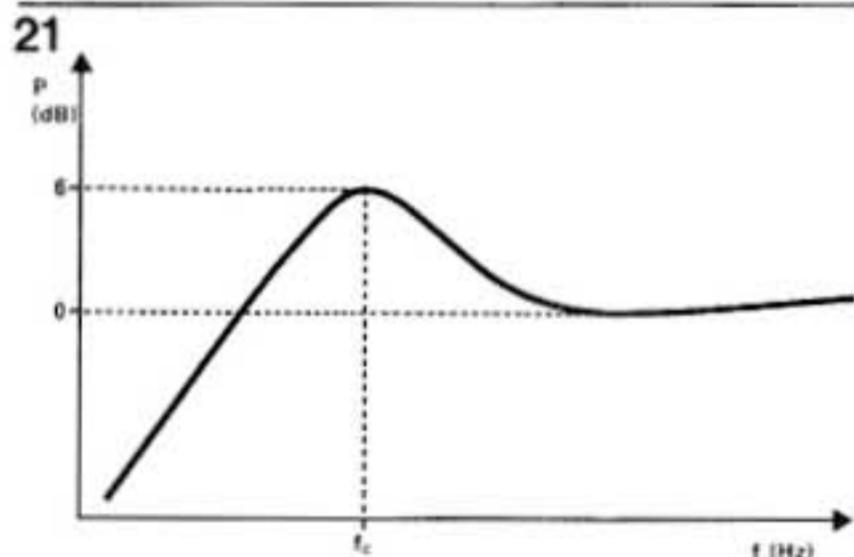
$$C_p = \frac{C_{cp} \cdot R_a \cdot R5 \cdot R7}{R4 \cdot R6 \cdot R8}$$

$$R_p = \frac{R_{rp}}{1 + \frac{C_{cp}}{C_{lp}}} \cdot \frac{R4 \cdot R6 \cdot R8}{R_a \cdot R5 \cdot R7}$$

$$L_p = \frac{C_{lp} \cdot R_a \cdot R_g \cdot R_{rp}}{R_a + R_g} \cdot \frac{R4 \cdot R6 \cdot R8}{R_a \cdot R5 \cdot R7}$$

$$G = \frac{1}{R_g} \cdot \frac{R_a \cdot R5}{R4 \cdot R6}$$

Zusätzlich zu der Schaltung aus Bild 5.19 wird noch ein Hochpaß-2ter Ordnung mit einer Filtergüte von $Q_f = 2$ benötigt, wie es am Ende von Kapitel 4 beschrieben wurde (Bild 5.21). Damit läßt sich die zugeführte Leistung für die Frequenz f_{box} erhöhen, falls bis zu dieser Frequenz der Schalldruckverlauf linear sein soll.



als Beispiel:

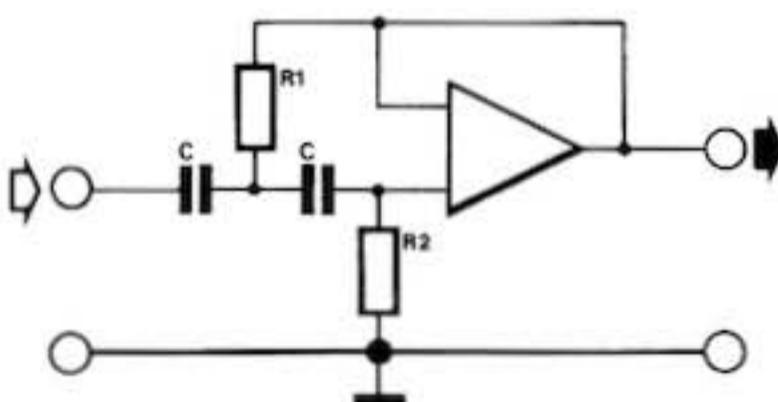


Bild 5.21. Kurve und Prinzipschaltung eines Hochpaßfilters.

Durch die aktiv entzerrte Baßreflexabstimmung (Butterworth 6ter Ordnung) verringert sich die nötige Membranauslenkung für gegebenen Schalldruck um den Faktor 4. Damit ist die mechanische Belastbarkeit und der maximale Schallpegel um den Faktor 16 besser als bei einer geschlossenen Box. In Verbindung mit der Amplitudenstatistik normaler Musikprogramme kann das oft der entscheidende Sprung über die 40 Hz Belastungshürde werden. Ein 13 cm Chassis mit 88 Quadratcentimeter effektiver Membranfläche kann so ein 25 cm Chassis in einer geschlossenen Box glatt an die Wand spielen und ein 25 cm Chassis leistet akustisch mehr als ein 38 cm Chassis in einer geschlossenen Box. Hier eröffnen sich mit kleinen Chassis, die eine hohe elektrische Belastbarkeit aufweisen (große Schwingspulen), völlig neue Dimensionen.

Anders als bei einer Gegenkopplung oder einer elektronischen Baßanhebung wird hier der Wirkungsgrad des Chassis nicht verringert. Die erforderlichen Verstärkerleistungen halten sich daher immer in vertretbaren Grenzen. Der Nachteil dieser Schaltung liegt darin, daß die Induktivität der Schwingspule durch den fehlenden Widerstand R_{dc} (der ja durch eine negative Ausgangsimpedanz des Verstärkers eliminiert wurde) einige unerfreuliche Resonanzen verursachen kann. So kann eine Resonanz von L_{vc} und der bewegten Masse, die als Kondensator im Ersatzschaltbild auftaucht, etwas oberhalb der ursprünglichen Resonanzfrequenz des Chassis die klanglichen Ergebnisse eher verschlechtern als verbessern. Weiterhin verschiebt sich beim Chassis mit hoher Induktivität der Schwingspule der -3 dB Punkt über Q_{vc} (Induktivität zu R_{dc}) zu niedrigen Frequenzen. Eine Änderung von L_{vc} verursacht je nach Bewegungsrichtung der Spule darüberhinaus noch Verzerrungen vom Typ k_2 . Es ist daher überaus wichtig, die Spuleninduktivität der Chassis zu kompensieren. Das ist natürlich bei Chassis mit induktivitätsverringenden Zutaten, das sind z.B. Kupferringe oder kupferbeschichtete Polkerne, einfacher als bei normalen Chassis. Weiterhin kann es sinnvoll sein, den Widerstand R_s in der Schaltung zu höheren Frequenzen hin zu verringern, um so die negative Impedanz des Endverstärkers ebenfalls zu verringern. In diesem Fall bleibt der -3 dB Punkt über Q_{vc} bis zur -3 dB Frequenz des Chassis variierbar. Eine Änderung von L_{vc} , die von der Bewe-

gungsrichtung der Spule abhängig ist, kann durch ein zweites Chassis kompensiert werden, wenn dieses umgekehrt montiert ist (zum Beispiel in einer ACE-Compoundbox).

Leider sind die gerade beschriebenen Konzepte immer mit recht hohem Rechen- und Meßaufwand verbunden, so daß die meisten Hifi-Fans in der Regel einfachere Lösungen zur Manipulation der Baßwiedergabe bevorzugen. Ein recht guter Kompromiß zwischen Konstruktionsaufwand und Ergebnissen sind die aktiven Baßreflexboxen 6ter Ordnung. Das Prinzip gleicht dem bereits von geschlossenen Boxen her bekannten Filter 6ter Ordnung, bei dem drei Filterstufen, zwei elektrische und ein mechanisches Filter, das Chassis, hintereinander geschaltet sind. Bei der Baßreflexbox haben wir zwei mechanische Filter, das Chassis und das Baßreflexgehäuse, sowie ein elektrisches Filter.

Aus diesem Grunde sind die Berechnungsergebnisse der geschlossenen- und der Baßreflexbox unterschiedlich. Es ist außerdem nicht (ohne weitere Elektronik wie die ACE Schaltung) möglich, aus einer schon vorhandenen geschlossenen Box eine Baßreflexbox 6ter Ordnung zu machen.

Für die Werte der drei Filterstufen gibt es, ebenso wie bei der geschlossenen Box 6ter Ordnung, verschiedene Möglichkeiten. Gilt der Wunsch einer tieferen Baßwiedergabe,

dann unterscheidet man drei Gruppen (Klassen). Für die Butterworth-Charakteristik sind die folgenden Parameter einzuhalten:

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Q_{ts} (Chassis) =	0,299	0,408	0,518
Q_f (Filter) =	1,930	0,707	0,518
V_{as}/V_{box} =	2,730	1,000	0,723
$f_{-3\text{ dB}}/f_s$ =	1,000	1,000	1,000
f_f (Filter) =	f_s	f_s	f_s
f_{box} (Reflexbox) =	f_s	f_s	f_s

Die Tabellenwerte gelten für die idealisierte Betrachtung ohne die unvermeidlichen Verluste der Gehäuse und einiger eingebauter Chassis. Für die Kompensation der Verluste müssen die Werte der Tabelle etwas geändert werden. Das gilt auch für Chassis mit anderen Q_{ts} -Faktoren. Beides zusammen macht die umfassende Berechnung der Baßreflexboxen etwas kompliziert, so daß wir in dem vorliegenden Buch nur eine Klasse näher erläutern können.

Die aktiv gefilterten Boxen der Klasse 1 erzeugen zwar für gleiche Ergebnisse etwas höhere Verzerrungen als die der Klassen 2 und 3, aber dafür sie bieten die kleinsten Gehäuse für eine bestimmte untere Grenzfrequenz.

Wie bereits erwähnt, sollten für den Einsatz in Baßreflex-Boxen nur sehr gute Chassis Ver-

k	Q_{ts}	α	h	Q_f	h_f	h_c
0,27337	0,488	0,844	0,7365	6,844	0,4613	0,4455
0,30432	0,461	0,926	0,7613	6,154	0,4844	0,4684
0,35576	0,427	1,082	0,8003	5,269	0,5239	0,5077
0,40514	0,403	1,219	0,8342	4,633	0,5624	0,5460
0,45227	0,385	1,363	0,8629	4,156	0,5993	0,5829
0,51087	0,368	1,542	0,8934	3,687	0,6449	0,6286
0,55229	0,358	1,666	0,9118	3,416	0,6768	0,6608
0,67154	0,335	2,007	0,9518	2,823	0,7667	0,7524
0,76387	0,322	2,243	0,9724	2,494	0,8342	0,8225
0,83284	0,314	2,403	0,9835	2,296	0,8836	0,8745
0,88309	0,309	2,511	0,9900	2,171	0,9191	0,9132
0,91916	0,305	2,583	0,9935	2,090	0,9443	0,9394
1,00000*	0,299	2,723	1,0000	1,932	1,0000	1,0000
1,20000	0,286	3,030	1,0087	1,633	1,1337	1,1503
1,50000	0,275	3,337	1,0121	1,341	1,3237	1,3780
2,00000	0,264	3,628	1,0108	1,059	1,6105	1,7633
2,30000	0,260	3,732	1,0093	0,953	1,7634	1,9951
2,50000	0,258	3,784	1,0083	0,899	1,8573	2,1483
2,70000	0,257	3,825	1,0075	0,853	1,9448	2,2994
3,00000	0,255	3,874	1,0064	0,798	2,0646	2,5205

wendung finden, so daß die Frage nach den Verzerrungen nicht so wichtig ist. Vorsicht aber bei dem verwendeten Opamp im Filter; bei einem Q_f von 1,93 wird die Verzerrung des Opamps um den Faktor 8,5 größer. Die Tabelle (unten links) zeigt die richtige Abstimmung der Klasse 1 im Idealfall, also ohne Gehäuseverluste.

Eine ernstzunehmende Obergrenze für den Q_{ts} -Wert der verwendeten Chassis liegt bei dieser Klasse bei (ungefähr) 0,40. Chassis mit höherem Q_{ts} machen eine echte Chebycheff-Abstimmung notwendig. Die führt hier zu extrem großen Membranbewegungen im Bereich unterhalb der Resonanzfrequenz des Gehäuses. Damit steigt das Risiko der Änderung des BI-Produktes bei großen Auslenkungen der Schwingspule erheblich an. Das System kann völlig aus der Kontrolle (des Endverstärkers) geraten. Vielleicht kennen sie den Klang einer solchen Baßreflexbox, die sich bei der Wiedergabe regelrecht verschluckt.

Einfluß von Gehäuseverlusten auf die Berechnung der Boxen:

- $Q_f = 1$ Verluste (größere Reibungswiderstände machen Q kleiner)
- α (V_{as}/V_{box}) verringert sich mit kleinerem Q_f
- Q_{ts} (Chassis) muß bei kleinerem Q_f größer werden
- Abstimmung von Gehäuseresonanz und Filterfrequenz werden kleiner oder größer, je nach Q_{ts} des Chassis
- Q_f (Filter) bleibt für eine bestimmte Güte Q_{ts} immer konstant

Bei einem Vergleich beider Tabellen stellt man deutliche Unterschiede fest, die nicht zu vernachlässigen sind.

Durch die komplexen Einflüsse der Verluste auf die verschiedenen Abstimmungen (auch oft Alignments genannt) gibt es hier nur einen sinnvollen Weg. Das Gehäuse sollte so verlustfrei wie möglich gebaut sein, d.h. stabile Gehäusewände und luftdichte Verbindungen. Nach dem Einbau des Chassis wird dann mit

- k = Pole-Shifting Faktor (ermöglicht die Berechnung der Welligkeit der Wiedergabekurve)
- Q_{ts} = Freiluftgüte des Chassis bei der Resonanzfrequenz f_s
- α = V_{as}/V_{box}
- h = Resonanzfrequenz des Gehäuses/Chassisresonanz f_s
- Q_f = Filtergüte des vorgeschalteten Filters 2ter Ordnung
- h_f = –3 dB Grenzfrequenz des vorgeschalteten Filters
- h_c = –3 dB Grenzfrequenz der kompletten Box/ f_s (Chassis)
- * = Butterworth Abstimmung

k	Q_{ts}	α	h	Q_f	h_f	h_c
0,45227	0,408	1,04	0,847	4,16	0,594	0,578
0,51087	0,388	1,19	0,882	3,69	0,641	0,624
0,55229	0,377	1,31	0,902	3,42	0,673	0,657
0,67145	0,352	1,61	0,947	2,82	0,765	0,750
0,76387	0,337	1,83	0,970	2,49	0,833	0,821
0,83284	0,329	1,97	0,982	2,30	0,883	0,874
0,88309	0,323	2,07	0,989	2,17	0,919	0,912
0,91916	0,319	2,14	0,993	2,09	0,944	0,939
1,00000*	0,312	2,27	1,000	1,93	1,000	1,000
1,20000	0,299	2,55	1,010	1,63	1,130	1,150
1,50000	0,286	2,83	1,010	1,34	1,320	1,380
2,00000	0,274	3,10	1,010	1,06	1,610	1,760
2,30000	0,270	3,20	1,010	0,95	1,760	2,000
2,50000	0,268	3,25	1,010	0,90	1,860	2,150
2,70000	0,266	3,29	1,010	0,85	1,950	2,300
3,00000	0,265	3,33	1,010	0,80	2,070	2,520

* = Butterworth-Abstimmung

Dämmstoff der Verlustfaktor auf $Q_1 = 7$ eingestellt. Damit wird die Box zwar etwas größer als notwendig, aber eine korrekte Abstimmung ist bei dieser Klasse 1 anders nicht zu erzielen. (Anders ist es bei der Klasse 2. Hier kann nach dem Zusammenbau über das vorgeschaltete Filter die Abstimmung für verschiedene Werte von Q_1 optimiert werden.)

Bei den vorgeschalteten elektronischen Filtern ist wieder zu beachten, daß sehr gute Opamps eingesetzt werden, denn eine Filtergüte von 4,16 erhöht die Verzerrungen des Opamps bei der verwendeten Hochpaß-Schaltung um den Faktor 35,6 !

Wer etwas experimentieren will, der kann noch andere Abstimmungen probieren. Es gibt sie noch reichlich; z.B. die folgende. Die Daten basieren auf Angaben der Firma Elektro-Voice (von D.B. Keele).

Die generelle Schreibweise für f_{box} , $f_{-3 \text{ dB}}$ und V_{box} kennen Sie bereits. Es ist:

$$f_{\text{box}} = f_{-3 \text{ dB}} = f_f (\text{Filter}) = 0,3 \frac{f_s}{Q_{ts}}$$

$$V_{\text{box}} = 4,1 \cdot Q_{ts}^2 \cdot V_{as}$$

Mit diesem Wissen lassen sich die theoretischen Werte für verschiedene Chassis ermitteln. Die folgende Tabelle zeigt einige dieser Werte.

Q_{ts}	α	h	Q_1	h_1
0,598	0,68	0,500	1,93	0,500
0,533	0,86	0,561	1,93	0,561
0,475	1,08	0,630	1,93	0,630
0,423	1,36	0,707	1,93	0,707
0,377	1,72	0,794	1,93	0,794
0,336	2,17	0,891	1,93	0,891
0,299	2,73	1,000	1,93	1,000*
0,266	3,44	1,122	1,93	1,122
0,237	4,33	1,260	1,93	1,260
0,211	5,46	1,414	1,93	1,414
0,188	6,88	1,587	1,93	1,587
0,168	8,67	1,782	1,93	1,782
0,150	10,92	2,000	1,93	2,000

* = Butterworth-Abstimmung

Die Werte gelten für den verlustfreien Einbau. Korrekturen für Verluste können in tabellarischer Form leider nicht gegeben werden, so daß einige Experimente für die besten Ergebnisse nötig werden. Für Chassis mit Q_{ts} -Werten über 0,3 bietet sich aber der Vorteil, daß die

Güte des vorgeschalteten Filters nie über 1,93 liegt. Damit werden einmal Verzerrungen durch das Filter selbst und auch Verzerrungen des Chassis durch eine Vergrößerung der zugeführten Leistung über den Faktor 2 hinaus vermieden.

Linkwitz-Filter

Das genügt momentan an Betrachtungen über Baßreflexboxen. Jetzt ist es noch interessant, einen Blick auf die Entzerrungsmöglichkeiten geschlossener Boxen bzw. von Chassis in Schallwänden (ohne Gehäuse) zu werfen. Diese Entzerrung kann nötig werden, wenn ein Chassis bei der Berechnung einer Frequenzweiche 4ter Ordnung mit einem vorgeschalteten 12 dB Filter (2ter Ordnung) nicht die gewünschte Trennfrequenz aufzeigt und eine Korrektur von Q_{tc} durch vorgeschaltete Widerstände nicht sinnvoll erscheint. Aber auch in vielen anderen Fällen kann eine Entzerrung sinnvoll sein, zum Beispiel zur Verbesserung der Baßwiedergabe. Ein sinnvoller Schritt in diese Richtung ist das altbekannte Linkwitz-Filter, mit dem sich Q_{ts} (Q_{tc}) und die Resonanzfrequenz von Lautsprecherchassis und geschlossenen Boxen fast beliebig variieren lassen. Die Schaltung hierzu (Bild 5.22) ist erfreulich simpel und wird einfach vor den vorhandenen Endverstärker geschaltet.

Zur Verbesserung der Tiefbaßwiedergabe wird f_c verringert. Q_{tc} ist frei wählbar und die Schaltung kann jeden Q_{tc} des eingebauten

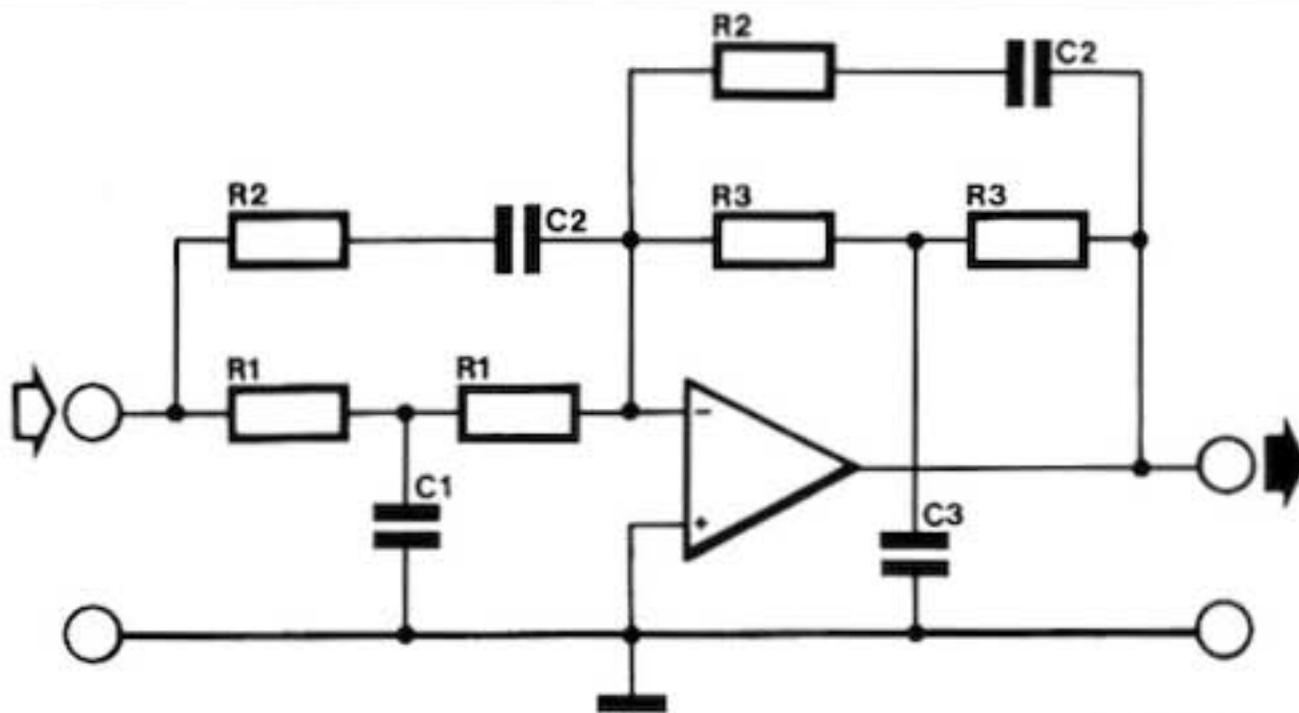
Bild 5.22. Die Linkwitz-Schaltung verändert auf elektronischem Wege die Chassisparameter f_s und Q_{ts} bzw. f_c und Q_{tc} .

Bild 5.23. Die Schalldruckkurven zeigen, wie die Linkwitz-Schaltung die Baßwiedergabe vorhandener Lautsprecherboxen verbessert:

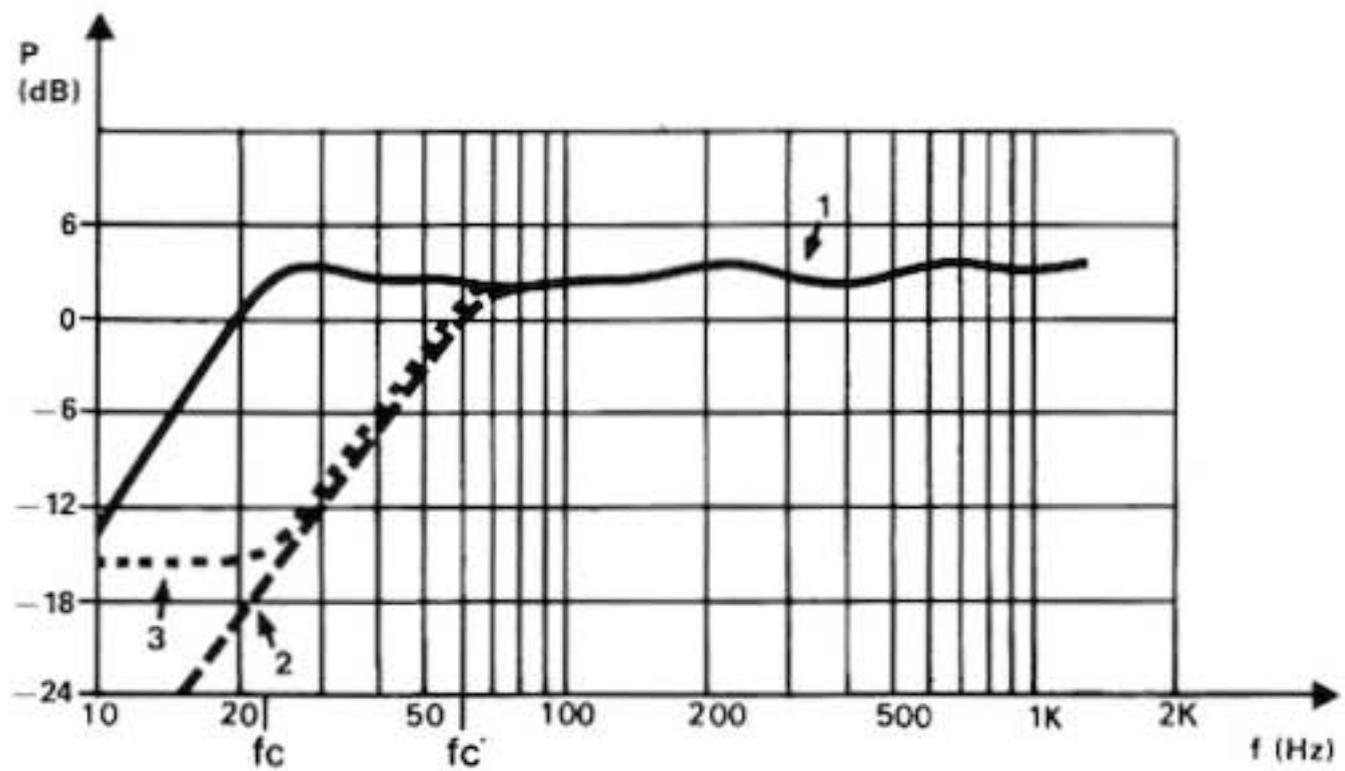
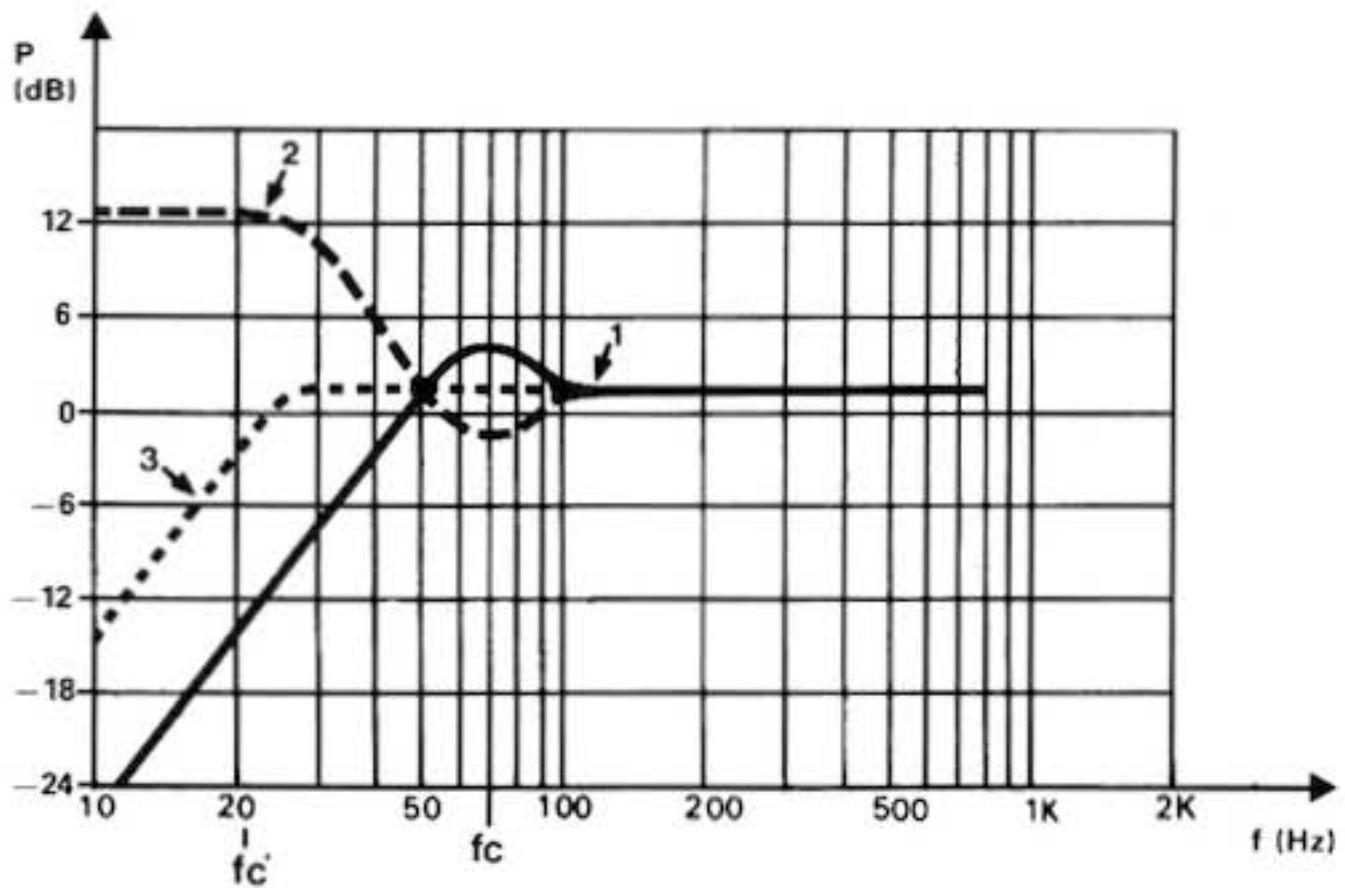
1. Schalldruckkurve der Lautsprecherbox
2. Wirkung des Filters
3. neue Schalldruckkurve

Bild 5.24. Hier ist das Linkwitz-Filter zur Verringerung der Baßwiedergabe einer Lautsprecherbox eingesetzt (z.B. für die Anpassung an den Hörraum und die Aufstellposition).

1. Schalldruckkurve der Lautsprecherbox
2. Wirkung des Filters
3. neue Schalldruckkurve



86902-5-22



Chassis kompensieren, auch Werte über 1,0! Diese Möglichkeit verbessert Lautsprecherboxen, bei denen große Chassis versehentlich in zu kleine Gehäuse geraten sind (Bild 5.23). Ebenso kann f'_c auch über f_c gelegt werden, wenn eine Box mit zu niedriger Resonanzfrequenz in sehr kleinen Räumen betrieben werden soll (Bild 5.24).

In beiden Fällen gilt nur eine Einschränkung:

$$0 < \frac{\frac{f_c}{f'_c} - \frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}}}{\frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}} - \frac{f'_c}{f_c}}$$

Weiterhin ist das Filter sehr gut zu verwenden, wenn die Übertragungsfunktion von Frequenzweichen nicht durch die des Chassis gestört werden soll.

Bei einer geplanten 24 dB Weiche können Sie die Übertragungsfunktion des Chassis gleich mit in die Berechnung einbeziehen. Hier korrigiert das Filter den Frequenzgang und Phasenverlauf des Chassis zwischen dessen Resonanzfrequenz und gewählter Übernahmefrequenz der Weiche, während ein vorgeschaltetes 12 dB Filter die Sperrwirkung des Filters auf 24 dB/Oktave ergänzt (Bild 5.25). Sie kennen das bereits vom Sonderfall des aktiven oder passiven 24 dB Filters, nur daß jetzt die Übernahmefrequenz frei wählbar ist.

Eine weitere Anwendung für dieses Filter ist bei der Suche nach Linear-Phase Response, also der Übertragung ohne Phasenfehler gegeben. Auch hier darf die Übertragungsfunktion des Chassis nicht die Ergebnisse einer phasen-

korrigierten Frequenzweiche verschlechtern. Der Phasenverlauf des Chassis sollte daher im Einsatz- und Übernahmebereich so linear wie

Bild 5.25. Die Übertragungsfunktion des Chassis (Hochpaß 2ter Ordnung) muß in die Berechnung einer 24 dB Weiche (Hochpaß 4ter Ordnung) mit einbezogen werden.

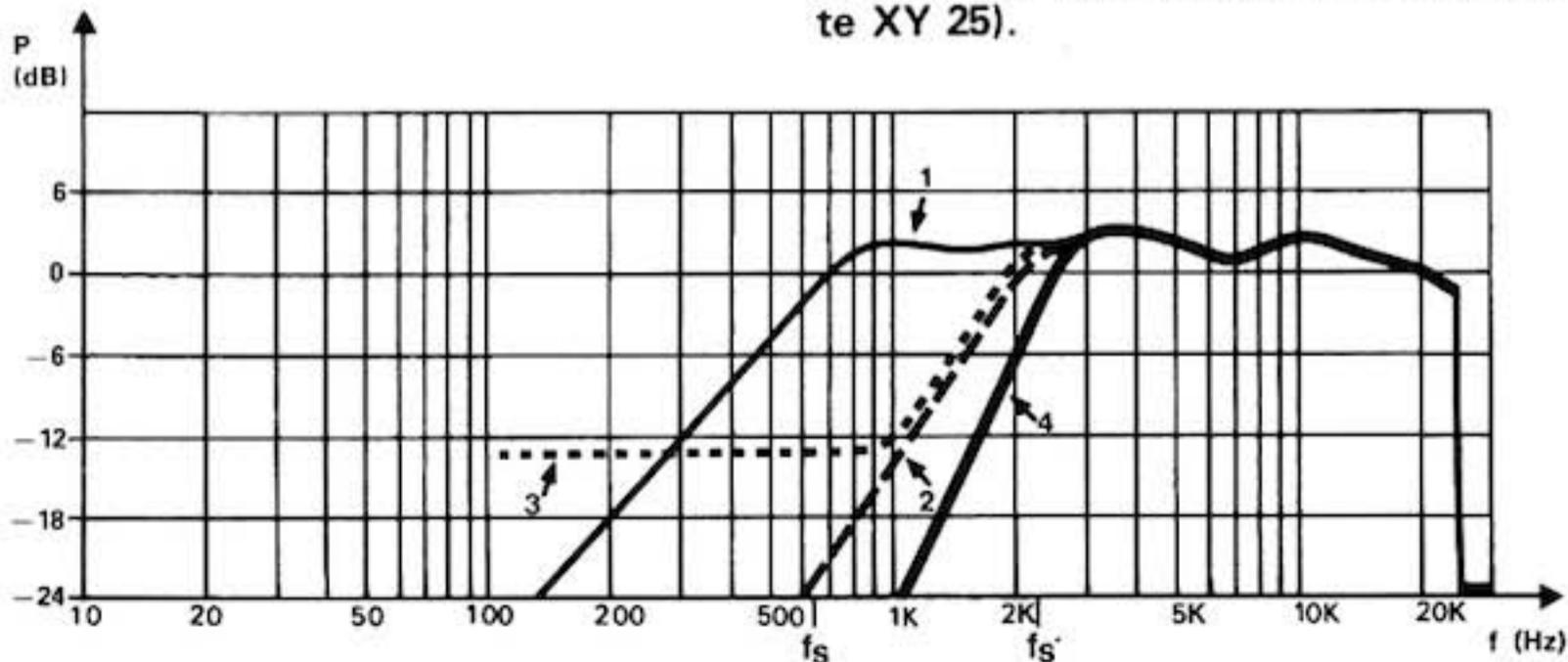
1. Schalldruckkurve des Hochtonchassis
2. 12 dB Hochpaß mit $f_c = f'_s$
3. Wirkung des Filters
4. Schalldruckkurve Chassis/Filter

Bild 5.26a. Bei der Realisierung von Linear Phase Kombinationen darf die Funktion der Frequenzweiche durch die Einflüsse der Chassis nicht gestört werden. Das ist bei guten Chassis kein Problem, wenn sich die Resonanzfrequenz von Hoch- und Mitteltonchassis weit unterhalb der Trennfrequenz der Frequenzweiche befindet.

1. Phasenverlauf des Chassis vor der Entzerrung.
2. Phasenverlauf des Chassis nach der Entzerrung auf f'_s .
3. Amplitudenverlauf nach der Entzerrung auf f'_s .
4. Amplitudenverlauf vor der Entzerrung.

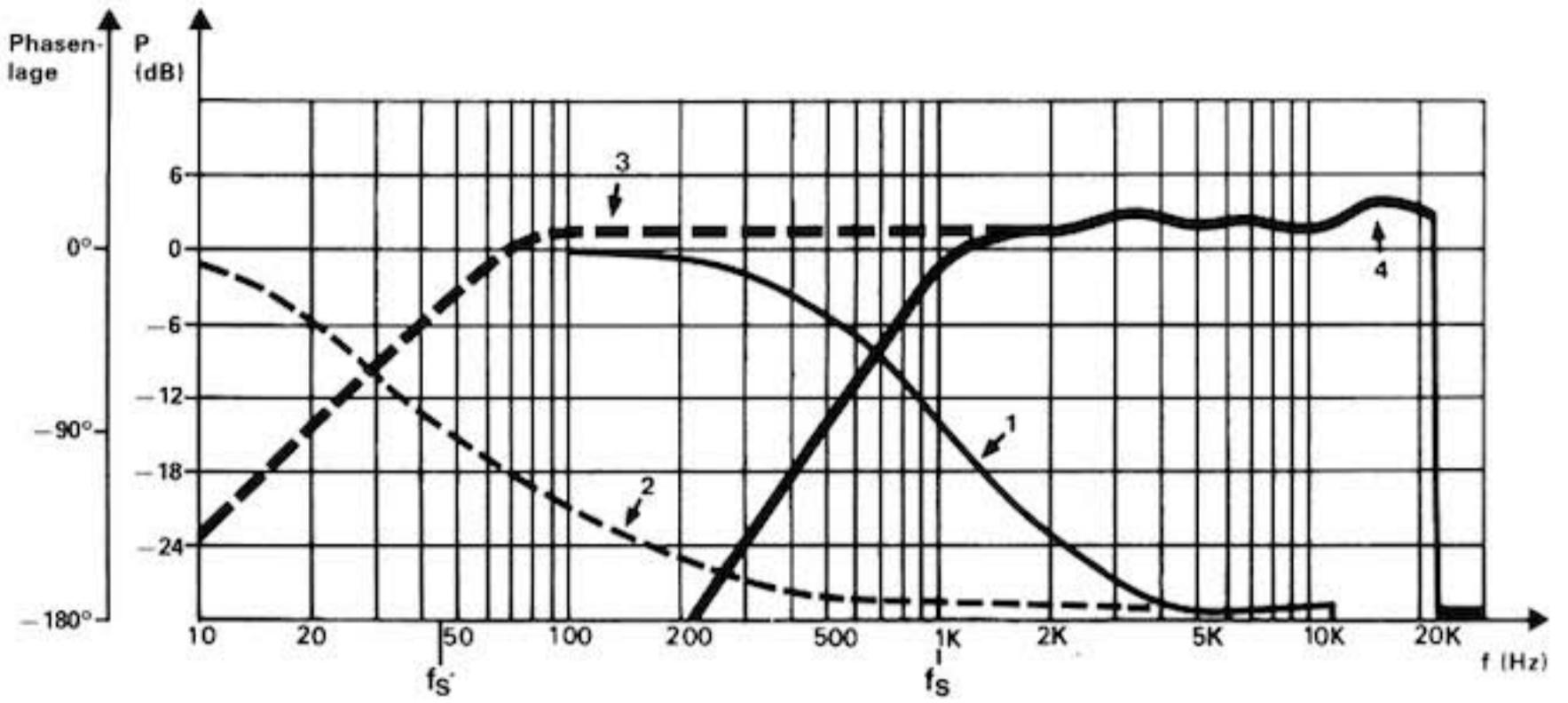
Bild 5.26b. Qualitativ minderwertige Chassis weisen bei höheren Frequenzen deutliche Änderungen der Phasenlage auf (Membranresonanzen usw.), die sich nicht beseitigen lassen. Die Phasenplots zeigen den Unterschied zwischen einem sehr guten Chassis (Hochtonkalotte T 120) und einem weniger guten (Hochtonkalotte XY 25).

25

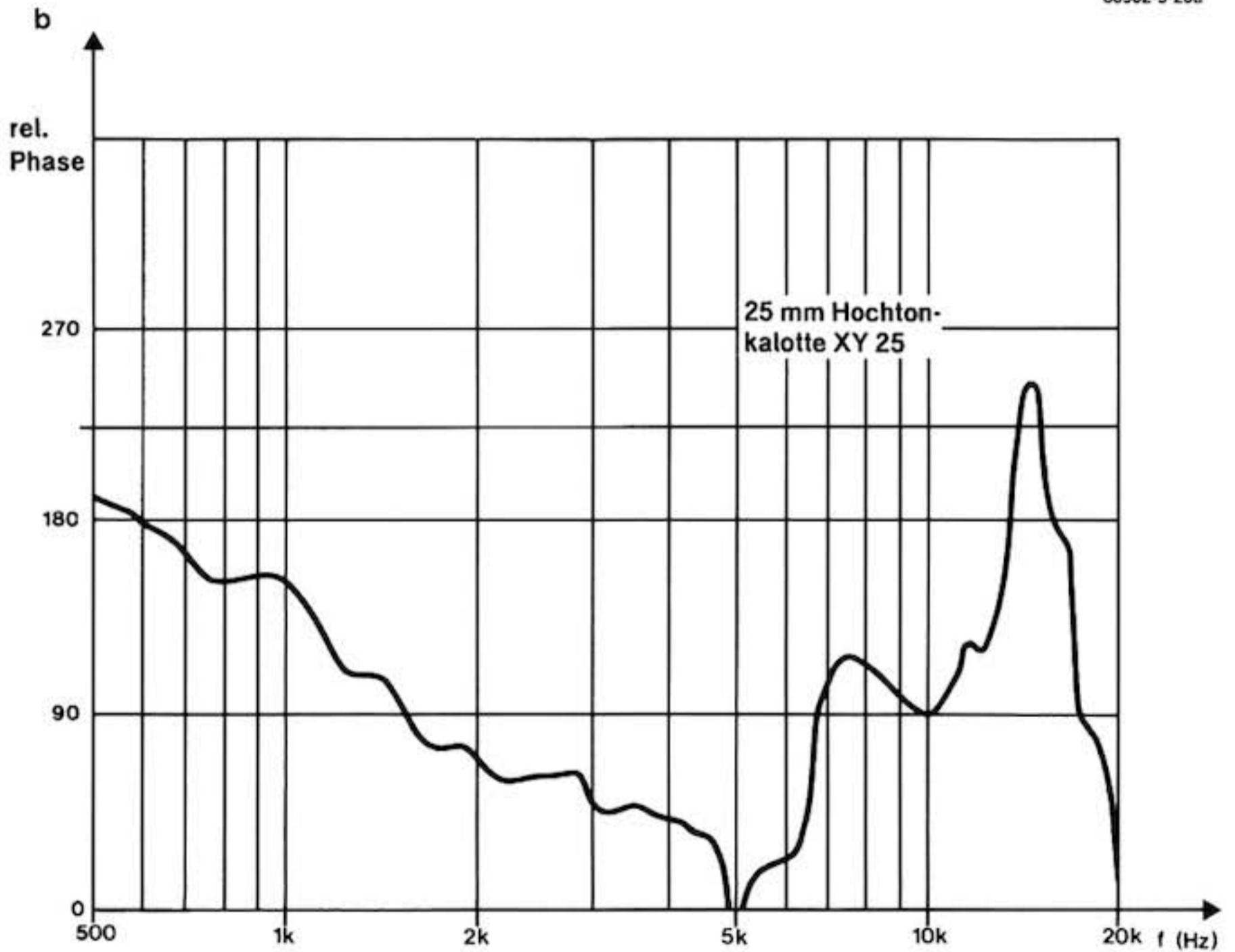


86902-5-25

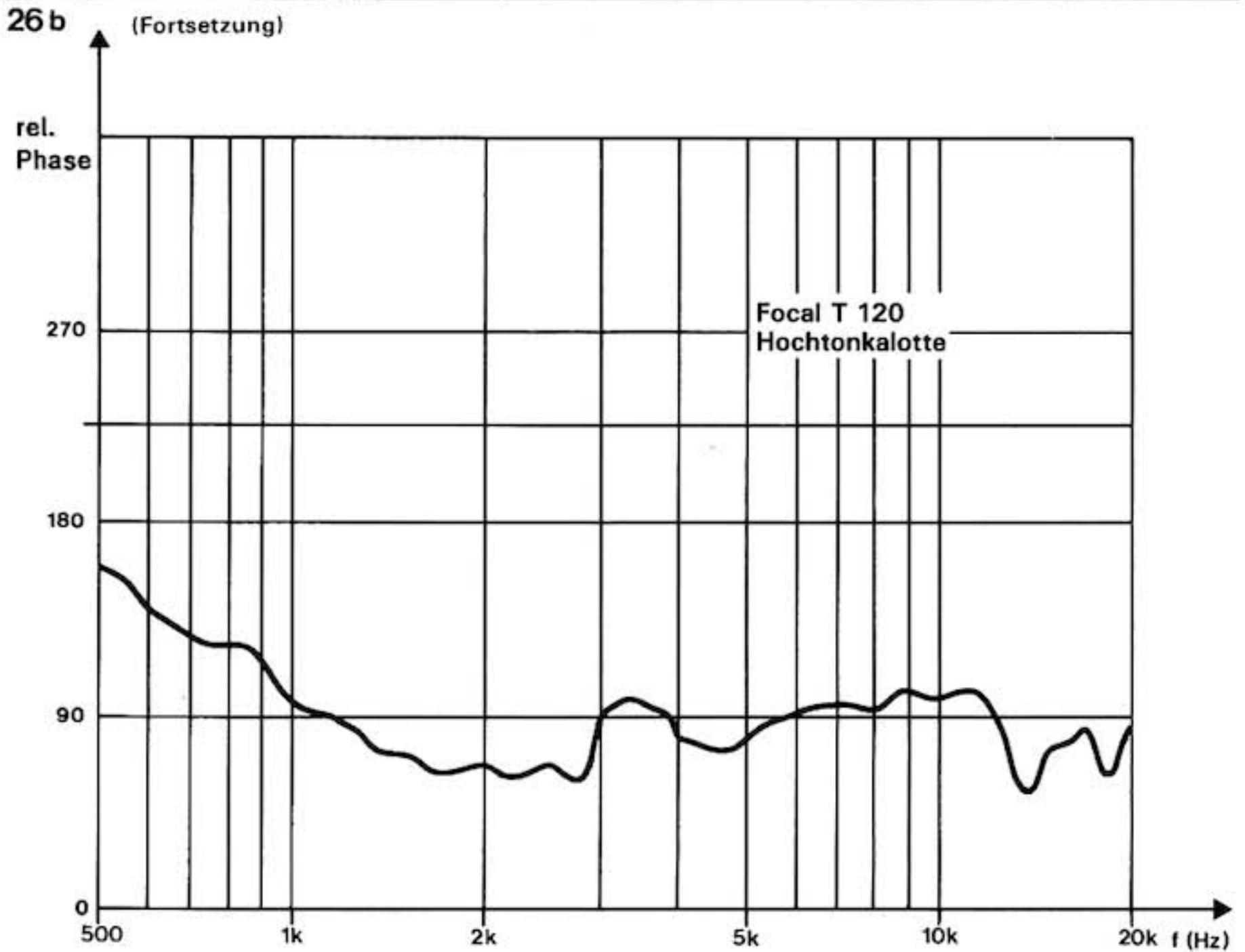
26a



86902-5-26a



86902-5-26b



möglich sein. Das funktioniert, wenn Sie dem Chassis eine tiefe Resonanzfrequenz verpassen und so die Einflüsse des Chassis ausquartieren (Bild 5.26).

Bitte warten Sie mit der Inbetriebnahme des Chassis, bis die phasenkorrigierte Frequenzweiche vorgeschaltet ist. Andernfalls könnte sich die Membran des so modifizierten Mittel- und Hochtonchassis in ein Ufo verwandeln.

Die Berechnung:

Wählen Sie für das Filter einen geeigneten Eingangswiderstand R_1 (10 k bis 200 k). Beginnen Sie die Berechnung mit dem Wert für k :

$$k = \frac{\frac{f_c}{f'_c} - \frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}}}{\frac{Q_{tc}}{Q'_{tc}} - \frac{f_c}{f'_c}}$$

k = Pole-Shifting-Filter

Es folgen die anderen Werte:

$$R_2 = 2 \cdot k \cdot R_1$$

$$R_3 = \left(\frac{f_c}{f'_c}\right)^2 \cdot R_1$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot Q_{tc} \cdot (1 + k)}{2\pi \cdot f_c \cdot R_1}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot Q_{tc} \cdot (k + 1) \cdot R_1}$$

$$C_3 = \left(\frac{f'_c}{f_c}\right)^2 \cdot C_1$$

Überprüfen Sie die Ergebnisse nach folgenden Beziehungen:

$$2\pi f_c = \frac{1}{R_1 \sqrt{C_1 \cdot C_2}}$$

$$2\pi f'_c = \frac{1}{R_3 \sqrt{C_2 \cdot C_3}}$$

$$Q_{tc} = \frac{R_1}{2 \cdot R_1 + R_2} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

$$Q'_{tc} = \frac{R3}{2 \cdot R3 + R2} \cdot \sqrt{\frac{C3}{C2}}$$

Zu der Theorie im Hintergrund. Die Übertragungsfunktion der geschlossenen Box ist:

$$f_{c(s)} = \frac{s^2}{s^2 + s \left(\frac{2\pi f_c}{Q_{tc}} \right) + 2\pi \cdot f_c^2}$$

Die neue Übertragungsfunktion soll die einer geschlossenen Box mit anderer Resonanzfrequenz (und Q_{tc}) sein:

$$f'_{c(s)} = \frac{s^2}{s^2 + s \left(\frac{2\pi f'_c}{Q'_{tc}} \right) + 2\pi \cdot f'_c{}^2}$$

Für die Übertragungsfunktion des Filters ergibt sich damit:

$$f_{f(s)} = \frac{s^2 + s \left(\frac{2\pi \cdot f_c}{Q_{tc}} \right) + 2\pi \cdot f_c^2}{s^2 + s \left(\frac{2\pi \cdot f'_c}{Q'_{tc}} \right) + 2\pi \cdot f'_c{}^2}$$

Das bedeutet: Dieses Filter kann nur mit Chassis in geschlossenen Gehäusen (oder ohne Gehäuse) eingesetzt werden. Andernfalls steht im Nenner eine Übertragungsfunktion höherer Ordnung; das verursacht u.U. Kosten.

Einige Worte zur Praxis; zuerst der unerfreuliche Teil. Wie bei allen entzerrten Systemen reagiert die Entzerrung beleidigt (d.h. auf schwer vorhersehbare Weise) auf Differenzen zwischen den tatsächlichen Daten des Chassis und den Daten, mit denen gerechnet wurde. Da nicht alle Hersteller ein ausgeprägtes Interesse daran haben, daß die Daten der Chassis immer mit denen im Prospekt übereinstimmen, ist es ratsam, die Chassisdaten selbst zu messen.

Da dieses Filter nur mit geschlossenen Gehäusen arbeitet, sind für tiefe und laute Baßwiedergabe sehr große Membranflächen erforderlich. Das nötige Gehäusevolumen ist jetzt im Prinzip eine Frage der gewählten Entzerrung, aber diese Entzerrung bestimmt auch gleich den effektiven Wirkungsgrad der Box. So erfordert eine Anhebung um 12 dB, das bedeutet für die Baßwiedergabe eine Anhebung um eine Oktave zu tieferen Frequenzen hin, direkt die 12-fache Leistung für gleichen Schallpegel. Sie sollten daher nicht übertreiben. Eine solche Anhebung ist zwar unterhalb 40 Hz über die Amplitudenstatistik ungefährlich, da die Anteile tiefer Frequenzen in normalem Musikprogramm nur sehr gering sind,

aber bei tieffrequenten Störsignalen kann der Verstärker überlastet werden. Als Folge dieses Clippings brennt Ihnen bei so entzerrten Passivboxen das Hochtonchassis durch (immer kommt es anders...). Bei diesen Konzepten sollten deshalb kräftige Verstärker bereitstehen; außerdem sollte man mit maximal 12 dB Anhebung bei 20 Hz zufrieden sein.

Zum Positiven. Das Filter ändert nichts an der Ordnung der Übertragungsfunktion. Bei einer Abstimmung auf Q_{tc} von 0,5 ist die beste Annäherung an das ideale Übertragungsverhalten eines Filters 1ter Ordnung gegeben. Dabei reduziert sich das Überschwingen der Kombination Chassis/Filter auf vernachlässigbare Werte.

Das Filter eignet sich auch sehr gut für Experimente mit der unteren Grenzfrequenz Ihres Abhörraumes. Sie erreichen zwar nicht die Leistungsfähigkeit des ACE Baßprinzips oder die einer Baßreflexbox mit 6ter Abstimmung, aber dafür sind sie wesentlich flexibler, wenn es darum geht, den Frequenzgang von Lautsprecherboxen schnell einmal zu variieren.

Wie bereits angedeutet, gibt es in jedem Raum zwar eine Frequenz, unterhalb der keine Schallwellen im Raum unterzubringen sind, aber diese Frequenz ist nicht die unterste Frequenz, die man noch im Raum hörbar machen könnte. Beim Druckkammermodell wird die Schallenergie durch Kompression bzw. Expansion der Luft des Abhörraumes hörbar. Mit großen Membranen, die ausreichend viel Luft verschieben können, ist dabei auch die Wiedergabe tiefster Frequenzen um 15 Hz möglich. Es ist nur ein Unterschied zu beachten: Der resultierende Schallpegel ist nur von der Kompression bzw. der Expansion der Luft abhängig. Das macht eine frequenzunabhängige und konstante Membranauslenkung für konstanten Schallpegel erforderlich. Ein Subwoofer für einen Einsatz nach dem Druckkammermodell wird damit auf sehr niedrige Werte für Q_{tc} und auf eine sehr tiefe Resonanzfrequenz f_c abgestimmt. Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über das benötigte Volume Displacement:

Pegel/dB	V_d/cm^3 pro 10 m ³ Raumvolumen
74 (20 Hz Hörschwelle)	7 bis 10
94 (mittel)	70 bis 100
114 (sehr hoch)	700 bis 1000

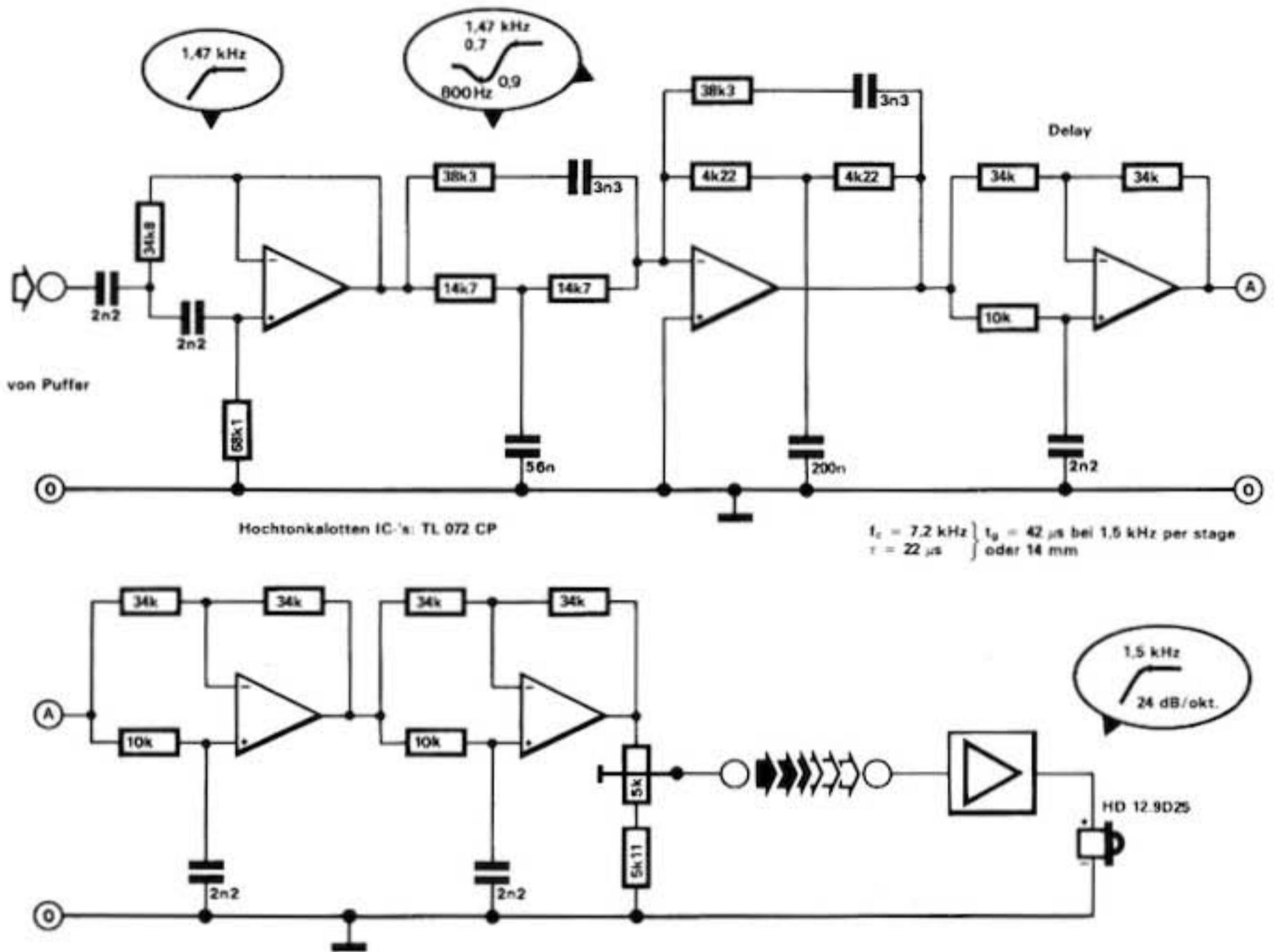
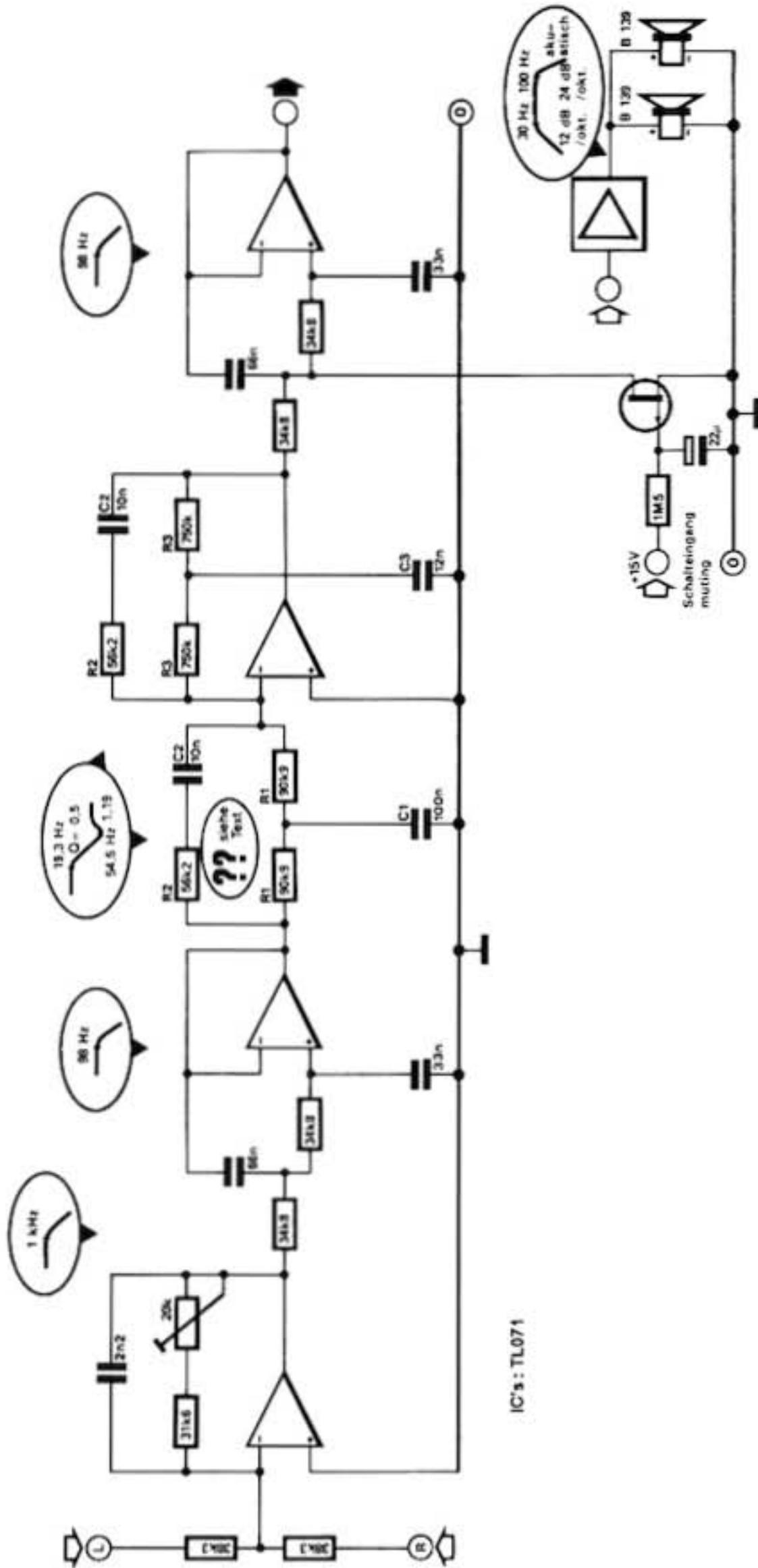


Bild 5.27. Das ist die Schaltung für eine komplette Anlage mit Subwoofer und Satellitenboxen. Insider kennen die Schaltung sicherlich aus verschiedenen Veröffentlichungen. Aber hat schon mal jemand die Werte überprüft? Es steckt nämlich ein kleiner Fehler drin.

Wie Sie sehen, ist es in sehr kleinen Räumen einfach. Ein V_d von 700 cm^3 ist mit einem 38 cm Chassis oder mit zwei 30 cm Chassis noch durchaus realisierbar, so daß Sie in einem 40 m^3 Raum noch gut 100 dB Schalldruckpegel erzeugen können. Das auch noch bei 10 Hz, wenn gewünscht, so daß selbst der Wiedergabe des dreigestrichenen C (8 Hz) nichts im Weg steht. (Es gibt allerdings die Schwierig-

keit, diesen Orgelton auf einen Tonträger zu bekommen; aber abwarten, was die CD-Technik hier noch liefert.) Bei mittelgroßen Räumen steigt der Aufwand, wenn hohe Schalldruckpegel realisiert werden sollen. Aber Werte um 95 dB sind immer noch machbar, was auf jeden Fall einen Versuch lohnt. Auch hier ist ja die Amplitudenstatistik im Spiel, so daß die Anteile dieser extrem tiefrequenten Signale um einige dBs unter dem Pegel des oberen Baßbereiches liegen.

Bei einer Planung derartiger Wiedergabeanlagen sollte immer ein getrenntes Lautsprechersystem für die Wiedergabe unterhalb der untersten Raumresonanzfrequenz eingesetzt werden. Dabei eignet sich ein Mono-Subwoofer ebenso wie zwei kleinere, die man in die Nähe der Stereoboxen plaziert. Es ist so einfacher, den Schalldruckpegel bei der Übernahmefrequenz anzupassen. Natürlich geht es auch anders, aber dann sollten die Tiefton-



86903-5-27

chassis in den Stereoboxen wirklich gut dimensioniert und zumindest ein Terzequalizer verfügbar sein.

Ein kleiner Hinweis in diesem Zusammenhang: Wenn Sie als Stereo-Satellitenboxen Baßreflexboxen einsetzen, dann ist der aufstellungsbedingte Gewinn im Baßbereich geringer als bei geschlossenen Boxen. Das ist eine Folge des steileren Verlaufs der Schalldruckkurve unterhalb der Resonanzfrequenz der Box, der Gewinn von 2/3 Oktaven aus der Tabelle schrumpft auf etwa 1/3 Oktav zusammen. Anders ist es nur bei den Baßreflexboxen, die eine geschlossene Box mit einem Q_{TC} -Wert von 0,5 simulieren.

Zum Abschluß dieses Kapitels noch die aktiven Tiefpaß-Filter 4ter Ordnung, die für aktive Frequenzweichen mit einer Butterworth-Charakteristik benötigt werden (Bild 5.29).

Die normierten Werte sind für Butterworth-Charakteristik:

$$\begin{aligned} R &= 1,0000 \\ C1 &= 1,0824 \\ C2 &= 0,9239 \\ C3 &= 2,6131 \\ C4 &= 0,3827 \end{aligned}$$

Die Werte für jede -3 dB Frequenz und für einen beliebigen Wert von R lassen sich nach der folgenden Beziehung leicht ermitteln:

$$C = \frac{C_{norm}}{2\pi \cdot f_{-3\text{ dB}} \cdot R}$$

Das gleiche Filter liefert die Linkwitz-Allpaß-Charakteristik, wenn im Tiefpaß folgende normierten Werte eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} R &= 1,00 \\ C1 &= 2,00 \\ C2 &= 1,00 \\ C3 &= 2,00 \\ C4 &= 1,00 \end{aligned}$$

Für den Hochpaß 4ter Ordnung werden R und $C1...C4$ vertauscht; für $C = 1,0$ gilt:

$$\begin{aligned} R1 &= 1,00 \\ R2 &= 2,00 \\ R3 &= 1,00 \\ R4 &= 2,00 \end{aligned}$$

Die wichtigsten elektronischen Eingriffsmöglichkeiten in die Hifi-Wiedergabe über Lautsprecherboxen sind damit erläutert.

28

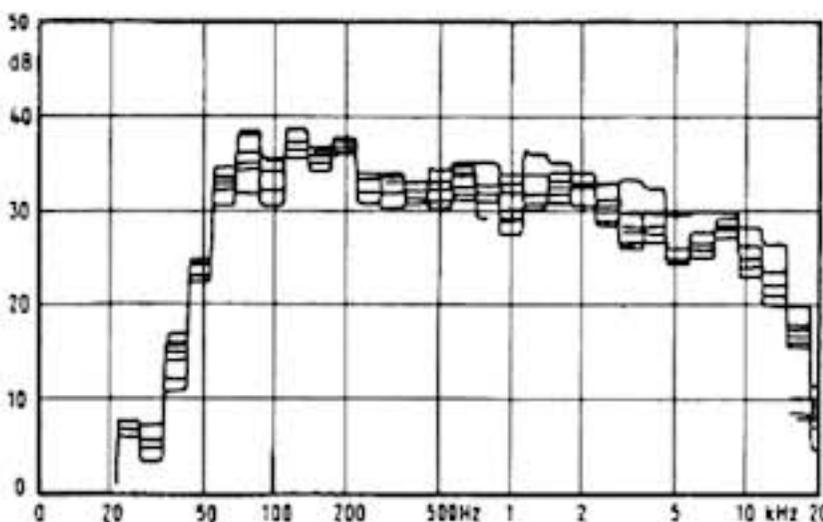
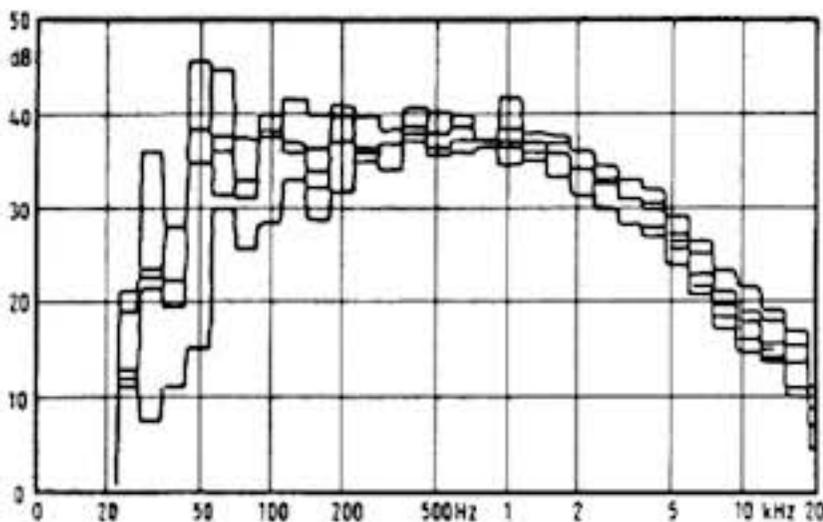
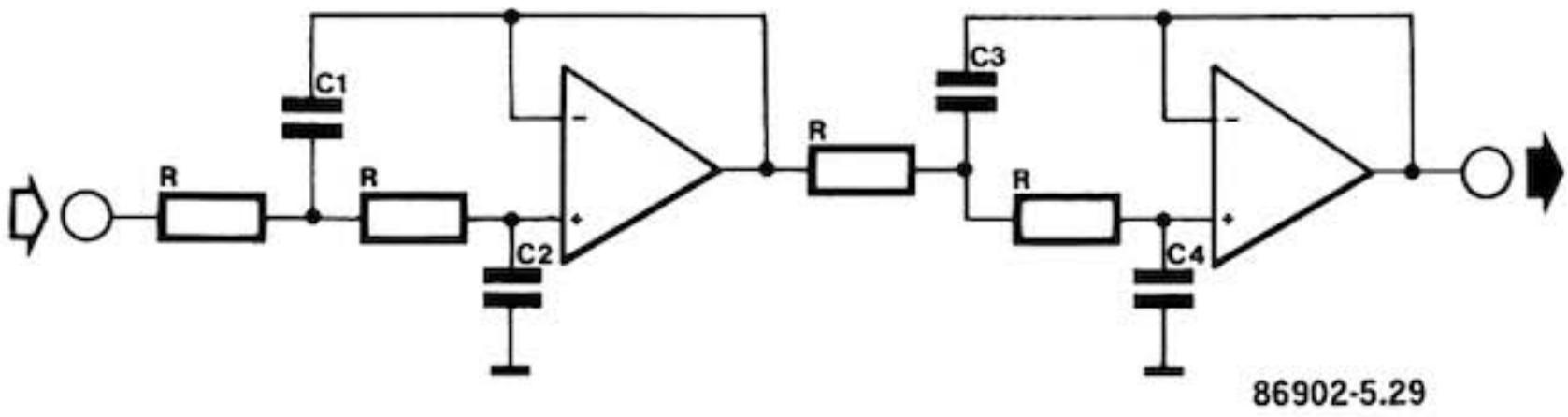


Bild 5.28. Die Amplitudenstatistik verschiedener Musikstücke zeigt erfreulicherweise, daß tiefe Frequenzen unter 50 Hz in normalen Musikprogrammen nur mit geringen Schallpegeln auftreten. Aus diesem Grund kann auch bei kleineren Lautsprecherboxen eine Baßanhebung erfolgen, ohne das Tieftonchassis zu überlasten.



86902-5.29

Bild 5.29. Prinzipschaltbild eines aktiven Tiefpaßfilters 4ter Ordnung.

Kapitel 6

Messungen an Lautsprecherchassis und Lautsprecherboxen

Um hinter die Geheimnisse (die Abweichungen der tatsächlichen Daten von den Prospektdaten) eines Lautsprecherchassis zu kommen, sind einige Messungen unerlässlich. Den Selbstbau-Fans sind manche dieser Messungen sicherlich aus den verschiedensten Veröffentlichungen bekannt. Dennoch dürfen hier einige Zeilen zu diesem Thema nicht fehlen. Es gibt ja auch einige Besitzer von Fertigboxen, die Modifikationen an ihren Lautsprecherboxen vornehmen wollen und die in der Vergangenheit nicht alle Veröffentlichungen über Lautsprecher-Meßtechnik gesammelt haben.

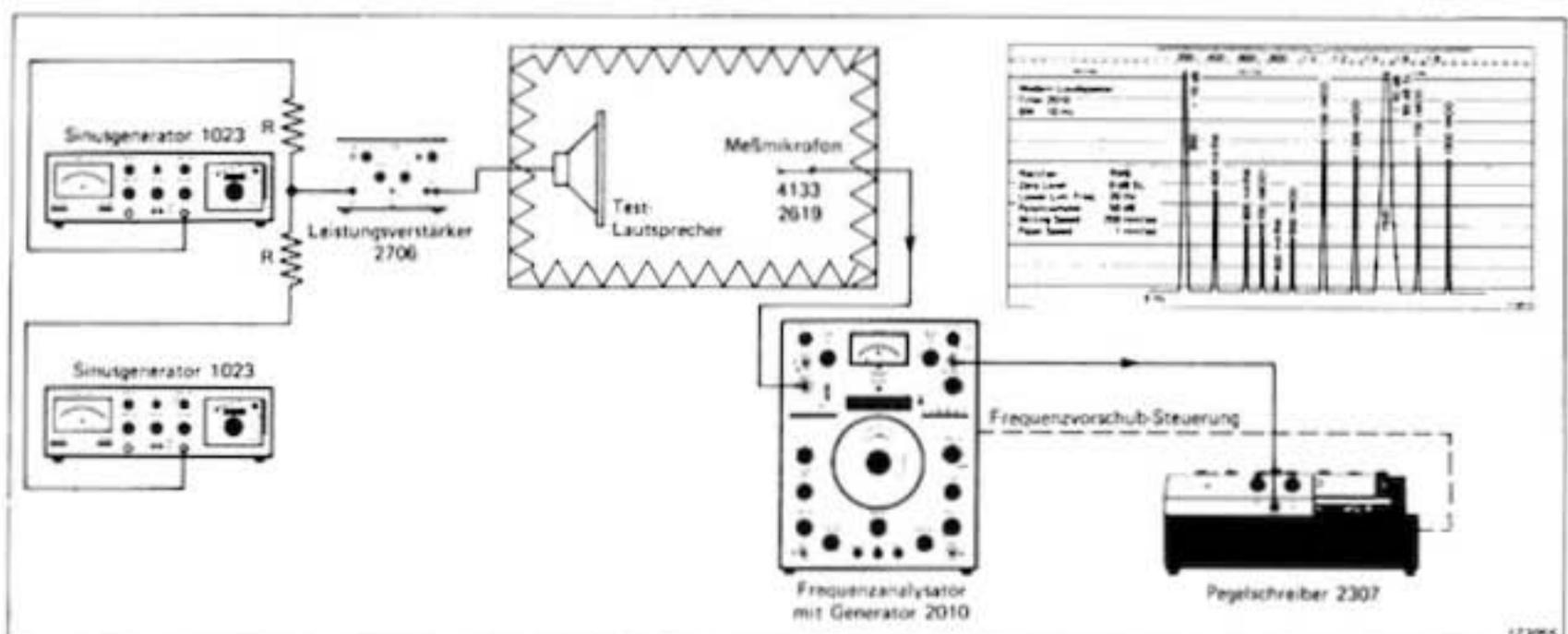
Das benötigte Werkzeug ist nicht besonders teuer, ein Multimeter mit guter Auflösung im Bereich um 10 Ohm, ein Amperemeter und ein Funktionsgenerator (mit Frequenzzähler ist vorteilhaft, aber nicht unbedingt nötig). Diese Geräte bilden das Grundwerkzeug für elektrische Messungen. Da Sie damit Ihre Boxen an Ihrem Verstärker messen und gegebenenfalls verbessern wollen, benutzen Sie den vorhandenen Verstärker gleich als Meßverstärker. Angesichts der erheblichen Abweichungen des Dämpfungsfaktors von den Prospektdaten (die bei 1000 Hz gemessen werden, und nicht

im Baßbereich, wo diese Dämpfung benötigt wird) ist dieses Vorgehen oft sehr viel sinnvoller, als die übliche Messung mit Konstantstromquellen. Es erfordert dafür aber auch etwas mehr Arbeit. Weiterhin benötigen Sie ein kleines Netzgerät mit einstellbarer Ausgangsspannung zur Messung von B_1 -Produkt und C_{ms} . Ein preiswertes Gerät genügt, da Sie bei allen Messungen Strom und Spannung simultan mit Multimeter und Amperemeter kontrollieren. Für Messungen an Baßreflexboxen, TL-Boxen und Hornlautsprechern können Sie sich ebenfalls mit diesen Geräten behelfen, zusätzlich leistet hier ein (ausgeliehenes) Zweikanal-Oszilloskop immer gute Dienste.

Die elektrischen Messungen gestatten es, zuerst alle Chassisparameter zu ermitteln. Das sind: Resonanzfrequenz, bewegte Masse, Nachgiebigkeit der Aufhängung, B_1 -Produkt, R_{dc} , Z_{max} , $Z_{45\text{ Grad}}$, Q_{ms} , Q_{es} , Q_{ts} (bzw. Q_{mcr} , Q_{ecr}

Bild 6.1. Für die privaten Messungen sind nicht unbedingt teure, aber dafür auch sehr gute Megeräte (z.B. der Firma Bruel & Kjaer) erforderlich. Auch mit preiswerten Geräten lassen sich Messungen mit ausreichender Genauigkeit durchführen.

1



86902-6.1

Q_{tc}) und V_{as} . Diese Daten sind auch als Thiele & Small Parameter im Lautsprecherbau bekannt.

Die genannten Daten sind der Ausgangspunkt für alle weiteren Schritte. Sie sollten daher so genau wie möglich ermittelt werden, um spätere Abweichungen vom gewünschten und mit diesen Daten berechneten Ergebnis gering zu halten. Dem steht leider einiges im Weg. Die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung ist je nach Material sehr temperaturabhängig, damit ändert sich dieser Wert ebenso wie die Resonanzfrequenz, wenn Sie bei unterschiedlichen Temperaturen messen. Weiterhin ist die Membranaufhängung bei neuen Chassis meist noch etwas steifer als nach kurzer Betriebszeit. Neue Chassis sollten daher immer einige Zeit mit geringer Leistung bei verschiedenen Frequenzen eingefahren werden. Statt verschiedener Frequenzen kann es auch gleich ein ganzes Spektrum sein. Dazu kann man ein Rauschsignal an das Chassis (die Box) anlegen. Dieses Rauschsignal liefert z.B. ein UKW-Tuner, es ist also kein zusätzlicher Generator erforderlich. Aber etwas Vorsicht ist angebracht. Der Tuner liefert weißes Rauschen, in dem alle Frequenzen mit gleicher Amplitude enthalten sind. Damit können bei größerer Lautstärke sehr hohe Leistungen an Mittel- und Hochtonchassis gelangen und sie beschädigen. Um das Rauschsignal zu entschärfen, kann eine Spule von ca. 1 Millihenry Induktivität zwischen Verstärker und Chassis (bzw. Box) geschaltet werden. Nach einigen Stunden Einfahrzeit hat sich eine neue Resonanzfrequenz eingestellt, die sich bei guten Chassis vorerst (einige Jahre) nicht mehr wesentlich ändert.

Auch bei der bewegten Masse ist etwas zu beachten. Hier geht bei tiefen Frequenzen eine mitschwingende Luftmasse mit in die Berechnung ein. Diese Luftmasse erhöht die Gesamtmasse des schwingenden Systems. Die gesamte bewegte Masse ist damit größer als die Masse von Membran, Aufhängung, Schwingspule und Schwingspulenträger. Die mitschwingende Luftmasse berechnet sich überschlägig zu:

$$M_{al} = 3,15 r^3$$

M_{al} = mitschwingende Luftmasse in kg

r = Membranradius in m

Der Widerstand R_{dc} ist temperaturabhängig, damit auch die gemessenen Werte für Q_m und Q_e . Bei deren Berechnung aus der Impe-

danzkurve spielt der Widerstand R_{dc} immer eine entscheidende Rolle. Vermeiden Sie daher Messungen mit höheren Leistungen über längere Zeit und kontrollieren Sie immer wieder R_{dc} .

Das gleiche gilt für Messungen des Bl-Produktes. Auch hier verringert eine steigende Spulentemperatur den Strom in der Spule für eine gegebene Spannung. Direkte Messungen mit einem Amperemeter sind daher genauer, als Berechnungen mit Hilfe der Spannung und dem Gleichstromwiderstand R_{dc} .

Bei Berechnungen von Q_m und Q_e aus der Impedanzkurve des Chassis darf die Induktivität der Schwingspule nicht vergessen werden. Bei Tieftonchassis mit hoher Induktivität werden sonst bei der Bestimmung Z_{max} und $Z_{45 Grad}$ falsche Werte ermittelt. Der Anteil der Induktivität an den Meßwerten errechnet sich zu:

$$X_{vc} = 2\pi \cdot f \cdot L_{vc}$$

X_{vc} = Induktiver Widerstand der Spule bei der Frequenz f

f = Meßfrequenz

Damit liegt die Resonanzfrequenz des Chassis (der Box) immer etwas unter der Frequenz, bei der sich die maximale Impedanz einstellt. Die -3 dB Frequenzen $Z_{45 Grad}$, aus denen Q_m und Q_e berechnet wird, müssen ebenfalls etwas korrigiert werden. Bevor also die vierte Stelle hinter dem Komma notiert wird, sollte kurz den Einfluß von X_{vc} auf die Meßergebnisse überschlagen werden. Das gleiche gilt natürlich auch, wenn ein Tieftonchassis in einer Lautsprecherbox gemessen wird, an das noch die Frequenzweiche angeschlossen ist. Es kommt sehr häufig vor, daß ein Chassis so gemessen wird, um Q_{tc} des eingebauten Chassis mit allen Vorwiderständen zu ermitteln. Dabei wird dann der induktive Einfluß der Spulen glatt vergessen. Immerhin hat eine Spule von 4 mH bei 80 Hz eine Impedanz von gut 2 Ohm, die man nicht einfach vergessen darf.

Nun zu den praktischen Messungen. Zuerst sollten Sie die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung des (eingefahrenen) Chassis ermitteln. Bringen Sie dazu verschiedene Gewichte M' in der Mitte der Membran eines waagrecht liegenden Chassis. Diese Gewichte bewegen die Membran um einen bestimmten Betrag aus der Ruhelage. Die Nachgiebigkeit errechnet sich nach der Formel:

$$C_{ms} = \frac{\Delta x}{9,807 \cdot M'}$$

M' = Zusatzgewicht in kg

Weiterhin bekommen Sie einen Überblick über den Bereich der linearen Membranauslenkung. Dazu werden die Gewichte Schritt für Schritt vergrößert, und die jeweiligen Auslenkungen der Membran notiert. Zur Messung der Auslenkung x ist eine leichtgängige Schieblehre gut geeignet, in Verbindung mit einer stabilen Auflage können Sie so auf 1/10 mm genau messen.

Mit der nächsten Messung wird das Bl -Produkt ermittelt; dabei bleibt die Membran weiterhin mit einem Gewicht belastet. Es wird eine Gleichspannungsquelle an das Chassis angeschlossen und die Spannung langsam erhöht, bis die Membran wieder in die Ruhelage zurückbewegt wird. Auch hier können Sie mit verschiedenen Gewichten arbeiten, um später einen Mittelwert zu bilden. Für das Bl -Produkt gilt:

$$Bl = 9,807 \frac{M'}{i}$$

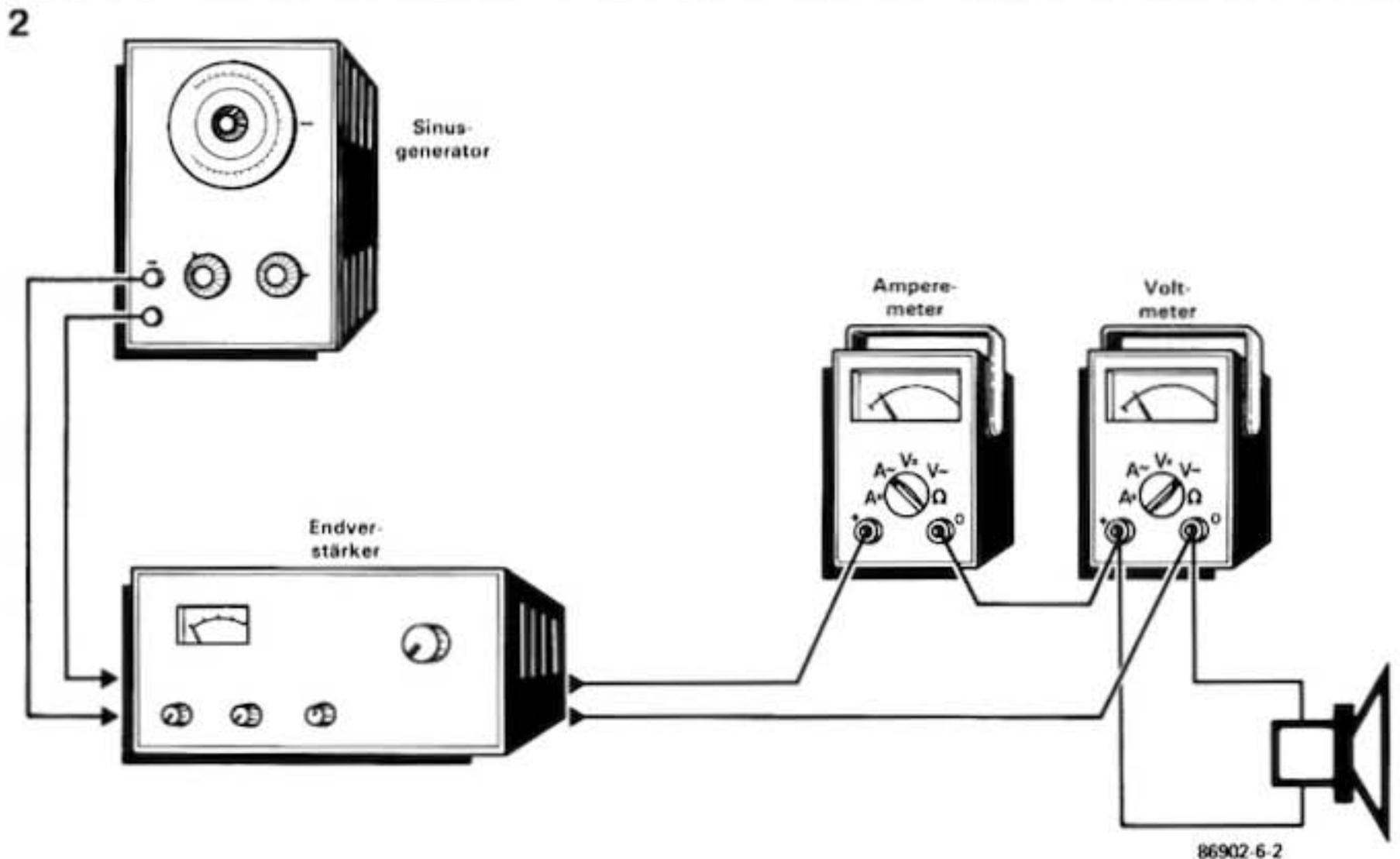
Dabei ist i die Stromstärke in Ampere, mit der die Membran wieder in die Ruhelage zurückkehrt. Die Gewichte sollten allerdings nicht zu

schwer sein, da die Belastbarkeit von Lautsprecherchassis bei Gleichstrom deutlich geringer ist als bei Wechselstromsignalen. Die Gewichte sollten so gewählt werden, daß die Membran bei Stromstärken von maximal 1 Ampere wieder in die Ausgangsposition ohne Gewicht zurückkehrt.

Nach diesen beiden Messungen ist der Meßaufbau zur Ermittlung der Resonanzfrequenz nach Bild 6.2 an der Reihe. Dazu wird der Sinusgenerator an den vorhandenen Verstärker und dieser dann an das Chassis angeschlossen. Parallel zum Chassis ist noch ein Voltmeter und in Reihe zwischen Endverstärker und Chassis ein Amperemeter vorzusehen.

Während Sie jetzt die Frequenz mit dem Sinusgenerator langsam von 10 Hz aufwärts ändern, kontrollieren Sie mit dem Voltmeter die Spannung an den Anschlußklemmen des Chassis. Die Spannung sollte immer einen konstanten Wert haben. Wählen Sie die Spannung so, daß die Membran gerade sichtbare

Bild 6.2. Die Konstanzspannungsmessung ist in der Regel genauer als die normalerweise angewendete Konstantstrommessung und berücksichtigt außerdem die Eigenarten Ihres Verstärkers (z.B. den Dämpfungsfaktor).



Auslenkungen bei tiefen Frequenzen zeigt. So werden Meßfehler durch zu geringe Ströme oder nichtlineares Verhalten der Membranaufhängung vermieden.

Bei Änderungen der Frequenz ändert sich jetzt der Strom, der durch die Schwingspule fließt. Er ist umgekehrt proportional zum Widerstand der Schwingspule. Es ist:

$$Z_{vc} = \frac{U}{I}$$

Die Frequenz, bei der der geringste Strom fließt, ist etwa die Resonanzfrequenz des Chassis (der Box). Für die maximale Impedanz Z gilt:

$$Z_{max} = \frac{U}{I_{min}}$$

Je nach L_{vc} des Chassis muß der Wert etwas korrigiert werden, um die exakte Resonanzfrequenz zu finden. Mit ausreichender Genauigkeit gilt:

$$Z_{fs} = Z_{max} - X_{vc(fZmax)}$$

$X_{vc(fZmax)}$ = Induktiver Widerstand der Schwingspule bei der Frequenz, für die der maximale Widerstand gemessen wird.

Im nächsten Schritt läßt sich die bewegte Masse über die Zusatzgewichte bestimmen. Je nach zusätzlichem Gewicht ändert sich die Resonanzfrequenz des Chassis um einen bestimmten Betrag. Die Gewichte werden dabei mit etwas abgewogener Plastilinmasse in der Mitte der Membran befestigt. Für die Berechnung gilt:

$$M_{md} = \frac{M'}{\left(\frac{f_s}{f'_s}\right)^2 - 1}$$

M' = gesamte Zusatzmasse

f_s = alte Resonanzfrequenz

f'_s = neue Resonanzfrequenz

Über die Resonanzgleichung müßte mit der gemessenen Masse und der gemessenen Nachgiebigkeit die gemessene Resonanzfrequenz exakt zu berechnen sein.

$$f_s = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C_{ms} \cdot M_{md}}}$$

Nur errechnen Sie meistens einen anderen Wert. Wenn das der Fall ist, dann können Sie

mit den folgenden Formeln den Wert überprüfen:

$$M_{md} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_s^2 \cdot C_{ms}}$$

$$C_{ms} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_s^2 \cdot M_{md}}$$

Es können dabei sowohl Fehler bei der Bestimmung von C_{ms} wie auch bei M_{md} aufgetreten sein. Je nach Abweichung müssen Sie gegebenenfalls noch einige neue Messungen mit größter Sorgfalt anstellen, um zu passenden Werten zu gelangen. Vergessen Sie dabei die zweite Kommastelle; diese Genauigkeit bringt nichts ein.

Jetzt geht es um die Gütefaktoren Q_m und Q_e . Berechnen sie aus dem korrigierten Wert für Z_{fs} und R_{dc} den Wert r_0 :

$$r_0 = \frac{Z_{max}}{R_{dc}}$$

Danach wird mit r_0 der Wert $\sqrt{r_0} \cdot R_{dc}$ berechnet. Die Frequenzen, bei denen die Impedanz des Chassis diesen Wert aufweist, sind in etwa die gesuchten -3 -dB-Frequenzen f_1 und f_2 . Die genauen Werte ergeben sich auch hier wieder nach Korrektur der Spuleninduktivität (wenn nötig).

f_{-3dB} = Frequenzen f_1 und f_2 , für die der Widerstand Z folgenden Wert hat:

$$Z_{-3dB} = \sqrt{r_0} \cdot R_{dc}$$

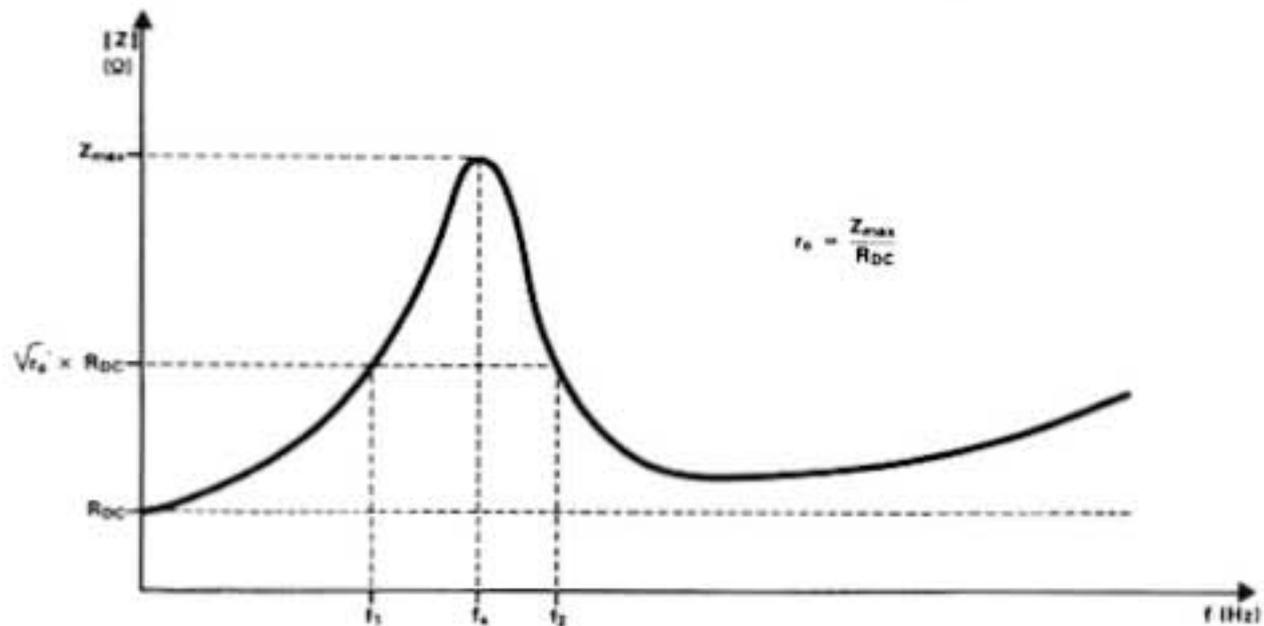
Wenn alles stimmt, dann gilt für die Differenz von f_2 und f_1 :

$$f_2 - f_1 = \sqrt{Z_{fs} \cdot R_{dc}}$$

Geht die Gleichung nicht auf, dann ist der Fehler sicherlich bei der Datenerfassung vorhergehender Messungen zu suchen. Sie sollten die Messungen mit größter Sorgfalt wiederholen. Die mechanische Güte Q_m ist jetzt leicht zu ermitteln:

$$Q_m = \frac{f_s \cdot \sqrt{r}}{f_2 - f_1}$$

Es ist dabei unerheblich, ob Sie nur ein Chas-



06002.6.3

Bild 6.3 Mit Hilfe der Werte Z_{\max} , R_{dc} , f_1 , f_2 sowie f_s (f_c im eingebauten Zustand) wird die Systemgüte Q_{ts} (Q_{tc}) ermittelt.

sis, eine Box mit oder ohne Dämmmaterial ausmessen, oder den Einfluß eines Variovents messen wollen.

Eine Messung von Q_m am ausgebauten Chassis ergibt den Reibungswiderstand der Aufhängung:

$$R_{ms} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{md}}{Q_{ms}}$$

Die elektrische Güte Q_e errechnet sich aus r und Q_m :

$$Q_e = \frac{Q_m}{r_0 - 1}$$

Die Gesamtgüte Q_t ist durch die Parallelschaltung von Q_e und Q_m festgelegt:

$$Q_t = \frac{Q_e \cdot Q_m}{Q_e + Q_m}$$

Wenn Sie wissen wollen, wieviel Prozent der Bedämpfung durch mechanische oder elektrische Widerstände realisiert werden, so finden Sie über R_{me} einen Wert, der sich direkt mit R_{ms} vergleichen läßt:

$$R_{me} = \frac{(Bl)^2}{R_{dc}}$$

Der Einfluß externer Widerstände kann auch berücksichtigt werden, indem R_{dc} entspre-

chend erhöht wird.

Zur Dimensionierung der Lautsprechergehäuse fehlt jetzt noch das Volumen V_{as} . Wenn Sie V_{as} aus angenäherten Werten für C_{ms} und S_d berechnen, dann kann es hier zu recht großen Fehlern kommen. Es ist daher oft sinnvoll, V_{as} mit einem Testgehäuse zu ermitteln. Das Testgehäuse darf nicht bedämpft werden und sollte ein genau bekanntes kleines Volumen von circa 5 l pro 100 cm² Membranfläche aufweisen. Über eine neue Messung von f_c und Q_{ec} des Chassis in der Testbox ergibt sich für V_{as} :

$$V_{as} = V_{tbox} \cdot \frac{f_c \cdot Q_{ec}}{f_s \cdot Q_{es}} - 1$$

V_{tbox} = Nettovolumen der Testbox

Die effektive Membranfläche ist jetzt:

$$S_d = \sqrt{\frac{V_{as}}{\rho_0 \cdot c^2 \cdot C_{ms}}}$$

ρ_0 = Luftdichte

c = Schallgeschwindigkeit

Der Membranradius ist:

$$r = \sqrt{\frac{S_d}{2\pi}}$$

Sollte der errechnete Membranradius größer als der halbe Chassisdurchmesser sein, dann ist sicherlich etwas falsch. Normalerweise müßte der effektive Membranradius gleich dem Halbmesser der Membran plus der Hälfte bis zwei Drittel der Sickenbreite betragen. Mit den Werten von f_s , V_{as} , Q_t , Q_m und Q_e

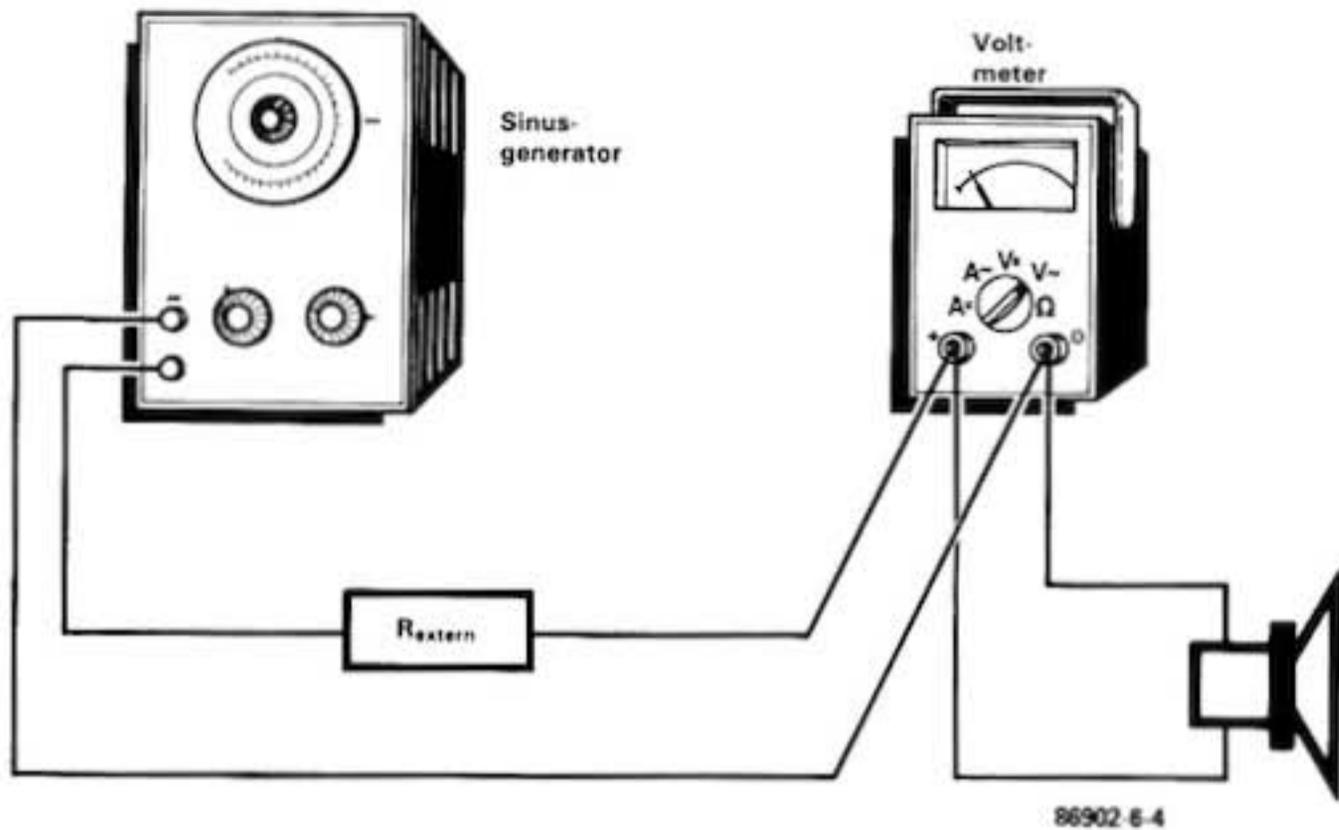


Bild 6.4. Bei der Konstantstrommessung muß der externe Widerstand sehr viel größer sein, als die interne Impedanz des Sinusgenerators (etwa Faktor 10).

sind nun alle Daten für die Dimensionierung der Lautsprechergehäuse bekannt.

Eine andere Meßmethode, mit der sich eine Impedanzmessung durchführen läßt, ist die Konstantstrommessung. Hierbei macht ein vorgeschalteter Widerstand aus dem Signalgenerator eine Konstantstromquelle (Bild 6.4), so daß jetzt die Spannung an den Anschlußklemmen des Verstärkers proportional zur Impedanz des Chassis ist.

Diese Meßmethode ist einfacher, aber die Werte stimmen nicht immer ganz genau mit den später am Verstärker erzielten Werten überein. Der Innenwiderstand des Verstärkers ist oft höher, als es nach den Prospektangaben zu erwarten wäre. Da dieser Innenwiderstand des Verstärkers immer in Reihe zum angeschlossenen Lautsprecher liegt, kann er Q_e ebenso beeinflussen wie die Zuleitungskabel oder die Frequenzweiche. Wer den technischen Daten des Verstärkers nicht traut, muß sie nachmessen.

Schließen Sie einen Signalgenerator an den Endverstärker an (Bild 6.5), der Ausgang des Verstärkers bleibt vorläufig noch ohne Abschlußwiderstand. Sie benötigen jetzt einen Lastwiderstand R_x in der Größenordnung der empfohlenen Anschlußimpedanz, bei der der

Verstärker seine volle Nennleistung mobilisiert (meist 8 Ohm).

Für die Ausgangsleistung des Verstärkers gilt:

$$P = \frac{U^2}{R_x}$$

Das ergibt bei einer effektiven Eingangsspannung von 28,3 V eine Ausgangsleistung von 100 W. Für eine Leistung von 50 W muß die effektive Eingangsspannung 20 V sein.

Sie erhöhen jetzt ohne Lastwiderstand am Ausgang die Eingangsspannung am Verstärker, bis die Spannung an den Ausgangsklemmen den Wert erreicht, bei dem über R_x die maximale Nennleistung anliegt. Bei 100 W an 8 Ohm sind das 28,3 V und für 72 W an 8 Ohm beträgt die Spannung noch 24,0 V.

Wenn Sie jetzt den Lastwiderstand mit den Ausgangsklemmen des Endverstärkers verbinden, sinkt die Ausgangsspannung U_0 um einen bestimmten Betrag auf U_1 ab. Der Verstärkerinnenwiderstand errechnet sich nach der Formel:

$$R_i = \frac{R_x (U_0 - U_1)}{U_1}$$

Jetzt wird es interessant. Wenn Sie jetzt die Ausgangsleistung für eine Signaleingangsfrequenz von 1000 Hz messen, muß das Meßergebnis mit den Prospektangaben auf jeden Fall übereinstimmen. Bei einem angegebenen

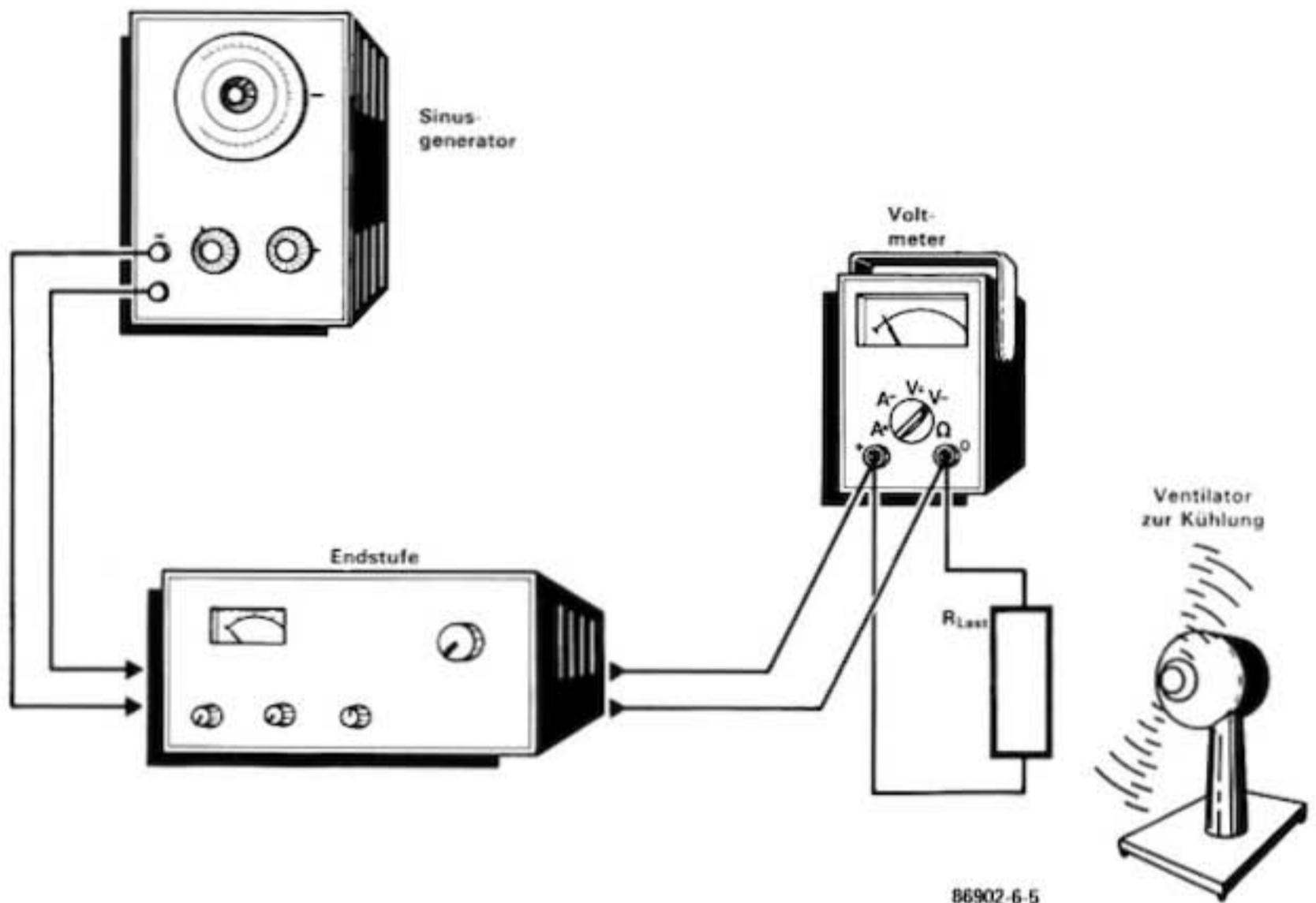
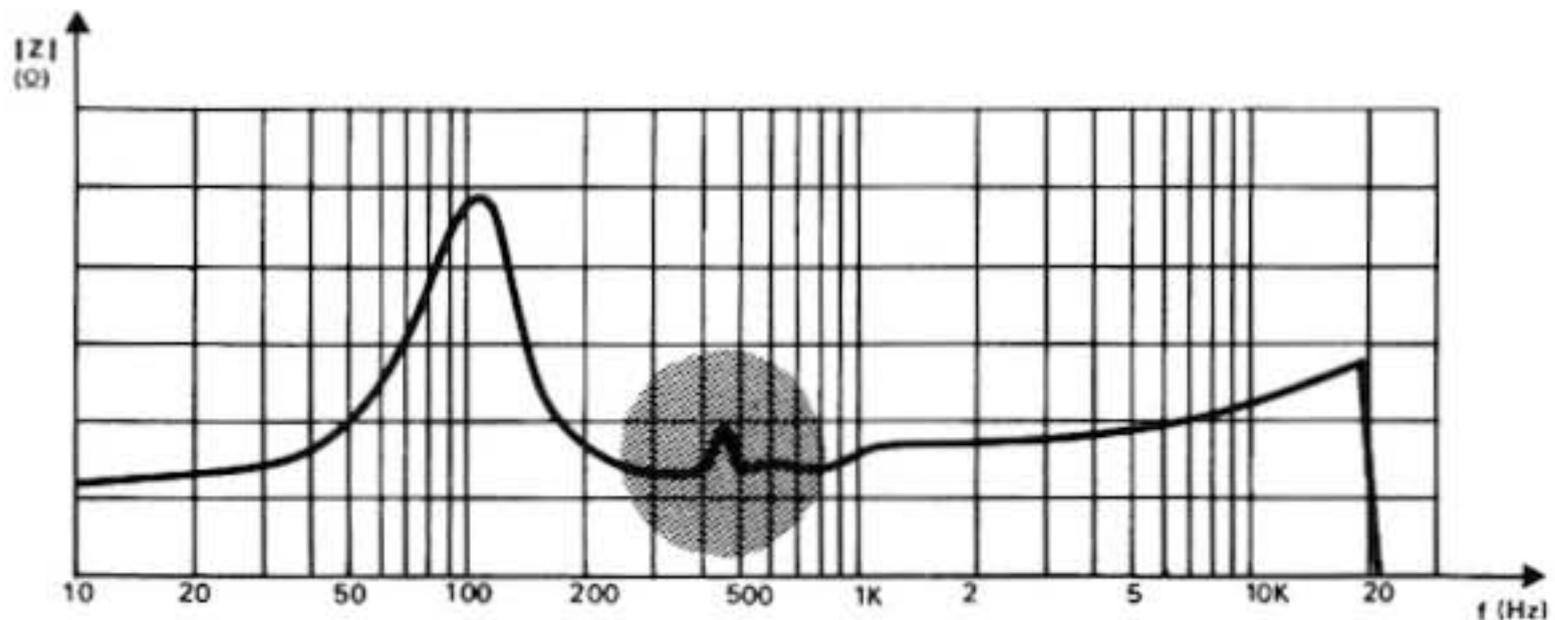


Bild 6.5. Einfache Meßanordnung.

Dämpfungsfaktor von 100 darf der Innenwiderstand eines 8 Ohm Verstärkers auf keinen Fall über 0,08 Ohm liegen (8 : 100). Bei der Frequenz von 1000 Hz wird der Innenwiderstand üblicherweise gemessen. Wenn Sie jetzt die Frequenz des Eingangssignals auf 40 Hz reduzieren (Eingangsspannung kontrollieren), denn etwa bei dieser Frequenz benötigen Sie die Bedämpfung für das Tieftonchassis, kann das den Dämpfungsfaktor deutlich herabsetzen. Falls Sie jetzt hier einen Wert von 1 Ohm messen, gilt für den Einfluß des Innenwiderstandes auf den Schalldruckverlauf der Lautsprecherbox das gleiche wie für nicht berücksichtigte Kabelwiderstände. Das Ergebnis kann als relative Baßanhebung deutlich hörbar werden. Diese Rechnung ist besonders für Besitzer von Röhrenendverstärkern sehr wichtig, da hier oft Werte über 1 Ohm als Verstärkerinnenwiderstände zu berücksichtigen sind. Nur wenn diese Widerstände bei der Konstruktion von Lautsprecherboxen berücksichtigt werden, fällt ihr negativer Einfluß aus der Rechnung. Zurück zur Impedanzkurve. Diese Kurve

enthält noch weitere wichtige Informationen über ein Chassis und das Lautsprechergehäuse. Sie finden die akustische Belastung durch den Strahlungswiderstand oder Gehäuseresonanzen ebenfalls in der Kurve, da sie die gesamte reflektierte mechanische Impedanz des Chassis zeigt. Üblicherweise ist der Strahlungswiderstand einer Lautsprechermembran vernachlässigbar gering und damit kaum anhand der Impedanzkurve feststellbar. Aber bereits das Baßreflexprinzip zeigt, daß Änderungen des Strahlungswiderstandes auch die Impedanzkurve verändern. Sehr viel drastischer geschieht das bei Hornlautsprechern, hier kann der hohe Strahlungswiderstand durch das vorgesetzte Horn die Impedanz eines Chassis weit über den Widerstand R_{dc} erhöhen. Es gibt Kombinationen, bei denen ein Chassis mit $R_{dc} = 3,2$ Ohm nach dem Einbau mit $Z_{min} = 10$ Ohm gemessen werden können; das über den gesamten Frequenzbereich und nicht nur in der Nähe einer Resonanzfrequenz. (Setzt man hier 8 oder 16 Ohm Chassis ein, kann es vorkommen, daß der hohe Wirkungsgrad der Hörner nicht ausgenutzt werden kann, da die Verstärkerlei-



86902-6-6

Bild 6.6 Die Impedanzkurve macht auch die Gehäuseeinflüsse sichtbar.

stung an den resultierenden hohen Anschlußimpedanzen von 20 bis 40 Ohm zusammenbricht. Dazu kommen wir aber später unter Hornlautsprecher noch ausführlicher.) Bei einer Gehäuseresonanz kann ebenfalls für ein schmales Frequenzband ein sehr geringer oder sehr hoher Belastungswiderstand der Membran auftreten. In diesem Fall ist das in der Impedanzkurve (Bild 6.6) oft als Peak zu sehen.

Ein Testgehäuse des Autors ist für V_{as} -Messungen auf 440 Hz abgestimmt, da die Rückwand genau 19,5 cm von der Membran des Chassis entfernt ist. Im Gehäuse findet eine $\lambda/4$ -Transformation statt. Das Druckmaximum an der Rückwand ist genau $1/4$ der Wellenlänge von 440 Hz von der Membran entfernt; dort ist ein Schnellmaximum. In diesem Schnellmaximum sieht die Membran praktisch keinen Strahlungswiderstand, da die Bewegung der Luftmoleküle eher schneller als die Membranbewegung ist. Die Membran wird regelrecht beschleunigt, was als größere Auslenkung den Peak in der Impedanzkurve verursacht. Als bremsender Widerstand muß der Strahlungswiderstand auf der Vorderseite der Membran herhalten, an dem jetzt eine höhere Schalleistung erzeugt wird. Bei fehlender Gehäuse-Rückwand entstünde so ein Transmission-Line Gehäuse. Statt des Druckmaximums an der Rückwand wäre jetzt hier ein Schnellmaximum und an der Membran ein Druckmaximum. Die Folge wäre eine

Verringerung der Impedanz, da die Auslenkung der Membran jetzt ebenfalls verringert würde. Diese Resonanzen haben leider meist ebenso schmale Bandbreiten wie die Raumresonanzen von Abhörräumen und werden bei Messungen gerne übersehen. Es ist sehr wichtig, bei Messungen von Impedanzkurven mit sehr langsamer Frequenzänderung zu arbeiten sowie das Volt- und das Amperemeter scharf im Auge zu behalten. Selbst kleine Peaks können ein Indiz für störende Klangverfärbung durch solche Gehäuseresonanzen sein. Gegen eine stufenförmige Veränderung der Impedanzkurve ist man dagegen oft machtlos. Weder mit Bedämpfung, noch mit Reflektoren im Gehäuse ist hier etwas zu ändern. Hier finden Sie die Veränderungen der Membran selbst, wenn sich deren strahlende Fläche frequenzabhängig ändert. Das gilt auch für den Übergang zu konstantem Strahlungswiderstand, der in der Nähe der Anpassungsfrequenz liegt (100 dividiert durch r in Meter). Leider sehen Sie auf der Skala des Volt- oder Amperemeters nur den Verlauf der Impedanz $Z_{chas (box)}$. Jede Impedanz besteht aber aus einem Real- und einem Imaginärteil, wobei der letzte auch als Blindwiderstand bekannt ist. Wenn Sie beide nach Betrag und Phase in ein Diagramm eintragen, ergibt das in der Nähe der Resonanzfrequenz ein Diagramm wie in Bild 6.7.

Die Interpretation ist noch recht einfach. Realteil R und Imaginärteil X addieren sich vektoriell zur Impedanz Z . Bei tiefen Frequenzen gehorcht die Kurve noch den einfachen Gesetzen eines Schwingkreises mit einer Masse und einer Feder. Bei höheren Frequenzen oder bei

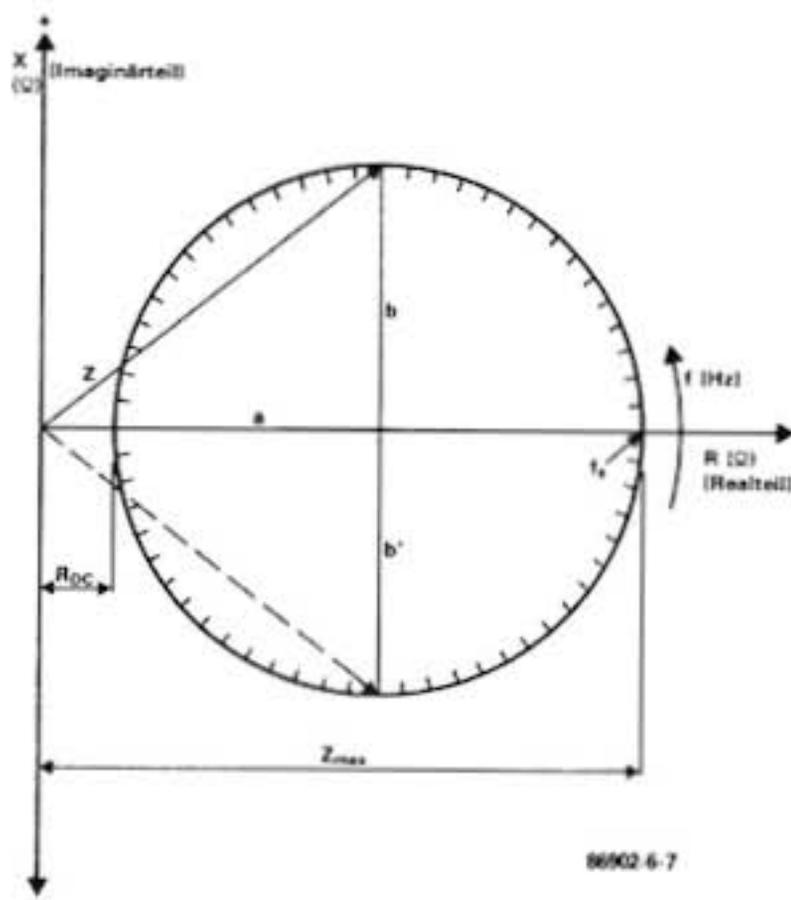


Bild 6.7. Eine normale Messung macht nicht die Zusammensetzung der Impedanz Z deutlich. Die Chassisimpedanz Z ist die Summe der komplexen Addition von Realanteilen (R_{dc}) und dem vom Antrieb des Chassis reflektierten Wert für R_{ms} und R_{str} sowie den ebenfalls vom Chassis reflektierten mechanischen Blindwiderständen Masse und Feder. Der Blindanteil ist auf der vertikalen Achse X aufgetragen.

Bei Messungen mit einem Frequenzgenerator folgt der Zeiger Z , dessen Länge ein Maß für die frequenzabhängige Impedanz des Chassis ist, der Kreisbahn f . Bei nur drei Positionen, bei denen der Phasenwinkel null Grad beträgt, gibt es einen rein realen Widerstandsanteil: bei null Hz, bei f_s und nach 360 Grad der Kreisbahn, in der sogenannten 2ten Serienresonanz. Bei höheren Frequenzen sind hauptsächlich die Membran und die Aufhängung sowie die Impedanz der Schwingspule für die Phasenlage zuständig.

einer Baßreflexbox ist es etwas anders, hier sind mehrere Masse- oder Federelemente im Spiel. Als Folge wird die Kurve etwas (oder mehr) verschnörkelt. Hier gibt die Skala der einfachen Meßgeräte keine Information über die Art der Zusammensetzung der Impedanz Z . Ein größerer Imaginärteil kann das gleiche Ergebnis bewirken wie ein größerer Realteil. Sie dürfen dann raten, was richtig ist. Bedämpfung durch Reibungs- oder Strahlungswiderstände sind als reale Widerstände positiv, da sie auch Resonanzen bedämpfen. Imaginäre Widerstände sind dagegen immer negativer Natur, da sie Ursache von Phasenfehlern sind und in Verbindung mit anderen Blindwiderständen (gleicher Wert und umgekehrtes Vorzeichen) Resonanzen verursachen. Es ist dabei durchaus möglich, daß die Kombination Chassis/Frequenzweiche Resonanzen aufzeigt, weil eine Spule der Frequenzweiche ausgerechnet bei der gleichen Frequenz den gleichen Blindwiderstand hat wie die reflektierte Membranmasse als Kondensator C_m im Ersatzschaltbild und das R_{dc} nicht ausreicht, um diese Resonanz wirksam zu bedämpfen. Außerdem ist es auch möglich, das der andere Kondensator C'_m einer in Teilschwingungen aufgebrochen Membran (Masse) die Resonanzbedingung erfüllt.

Wenn Sie hierüber Klarheit haben wollen, dann ist ein Meßinstrument erforderlich, das Amplitude und Phasenlage gleichzeitig darstellen kann: ein Oszilloskop. Die dann erforderliche Meßanordnung zeigt Bild 6.8.

In diesem Fall ist die Konstantstrommessung sinnvoller. Es ist dann nur die Frequenz des Generators zu ändern, ohne die Spannung jedesmal neu justieren zu müssen. Bei realen Widerständen erhalten Sie immer einen geraden Strich auf dem Schirm, während imaginäre Komponenten je nach Anteil aus der geraden Linie eine Kreisform machen. Bei der Konstantstrommessung ändert jede Veränderung der Impedanz die Höhe der Abbildung auf dem Oszilloskopschirm. Aus der Form ist deutlich zu erkennen, wie sich imaginäre und reale Widerstände zueinander verhalten. Das gleiche Verfahren läßt sich natürlich auch bei einer Messung mit konstanter Spannung einsetzen, wenn Sie nach Einflüssen Ihres Verstärkers auf Ihre Lautsprecherboxen (Frequenzweichen) suchen. Nur bleibt jetzt die Bildhöhe konstant; es ändert sich die Breite mit der Impedanz Z (Bild 6.9).

Soweit zu den rein elektrischen Messungen. Daneben ist es ohne Frage auch einmal sehr interessant das zu messen, was man hört: den Schalldruck. Nur gibt es hier sofort das Problem, den Schalldruck tatsächlich auch so zu messen, wie Sie ihn hören. Wir können in diesem Buch noch nicht ausführlicher auf den Hintergrund der modifizierten Gating Messung eingehen bzw. ohne weitere Erklärungen Baupläne veröffentlichen. Aber eine andere Meßmethode muß hier kurz erklärt werden: die Nahfeldmessung. Wenn ein Meßmikrofon unmittelbar vor einer Lautsprechermembran aufgestellt wird, wobei der Abstand zur Membran kleiner als 1/10 des Membranradius sein muß, spricht man von einer Nahfeldmessung. Bei dieser Messung werden Raumeinflüsse des Abhörortes auf die Messung fast völlig (-50 dB und mehr) vermieden. Sie können also auch in den eigenen vier Wänden mit großer Genauigkeit messen, ohne einen schallabsorbierenden Meßraum anmieten zu müssen. Selbst bei tiefen Frequenzen kann dabei die Meßgenauigkeit noch sehr gut sein. Allerdings ist das mit den Kosten von Meßmikrophonen für Frequenzen unter 60 Hz so eine Sache. Aber auch mit preiswerteren Mikrophonen ist die Nahfeldmessung kaum zu ersetzen. Es gibt z.B. von der Firma Sennheiser kleine Kondensatormikrophone, mit denen nicht nur solche Nahfeldmessungen zur Ermittlung des Schalldruckverlaufs, sondern auch Verzerrungsmessungen mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden können (im Hifi-Bereich, nicht nur nach DIN). Ein solches Mikrophon wurde z.B. im Echtzeit-Terz-Analyser (Elektorheft Mai 1984) verwendet. Bei einer Analyse der Nahfeldkondition finden Sie folgenden Zusammenhang:

$$P_n = \frac{P_f \cdot 2a}{r}$$

P_n = Schalldruck im Nahfeld
 P_f = Schalldruck im Fernfeld (Halbkugel)
 r = Membranradius
 a = Entfernung Meßpunkt/Membran
 Verglichen mit dem Schalldruck bei kugelförmiger Abstrahlung gilt folglich:

$$P_n = \frac{P_f \cdot 4a}{r}$$

Damit ist der Nahfeldpegel frequenzunabhängig um einen bestimmten Betrag höher, als der

Pegel im Fernfeld. Das ist der ganze Trick, mit dem sich Störgeräusche wie Raumreflexionen einfach ausblenden lassen, ohne die Meßwerte zu verfälschen. Beim Übergang von einer Nahfeldmessung zur Fernfeldmessung bei halbkugelförmiger Abstrahlung würden Sie daher die in Bild 6.10 gezeichnete Veränderung der Schalldruckkurve feststellen.

Etwas anders ist es, wenn Sie den Kurvenverlauf einer Nahfeldmessung mit dem einer Fernfeldmessung bei kugelförmiger Abstrahlung vergleichen. Dieser Unterschied ist in Bild 6.11 dargestellt.

Bei Bild 6.11 hat sich weder ein Zeichen- noch ein Meßfehler eingeschlichen. Es ist lediglich der Einfluß der Schallwand zu sehen, deren Abmessungen die kugelförmige Abstrahlung zu hohen Frequenzen verhindern und eine zunehmende Bündelung verursachen.

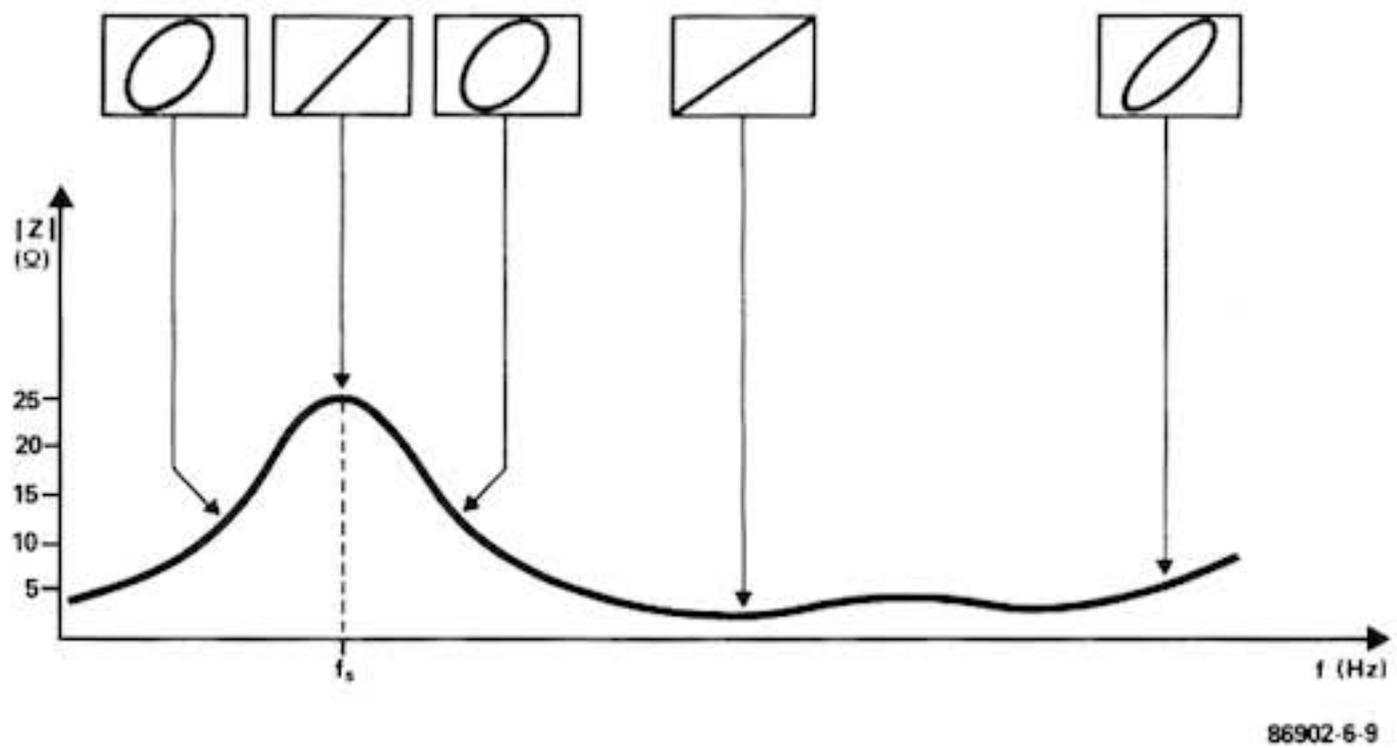
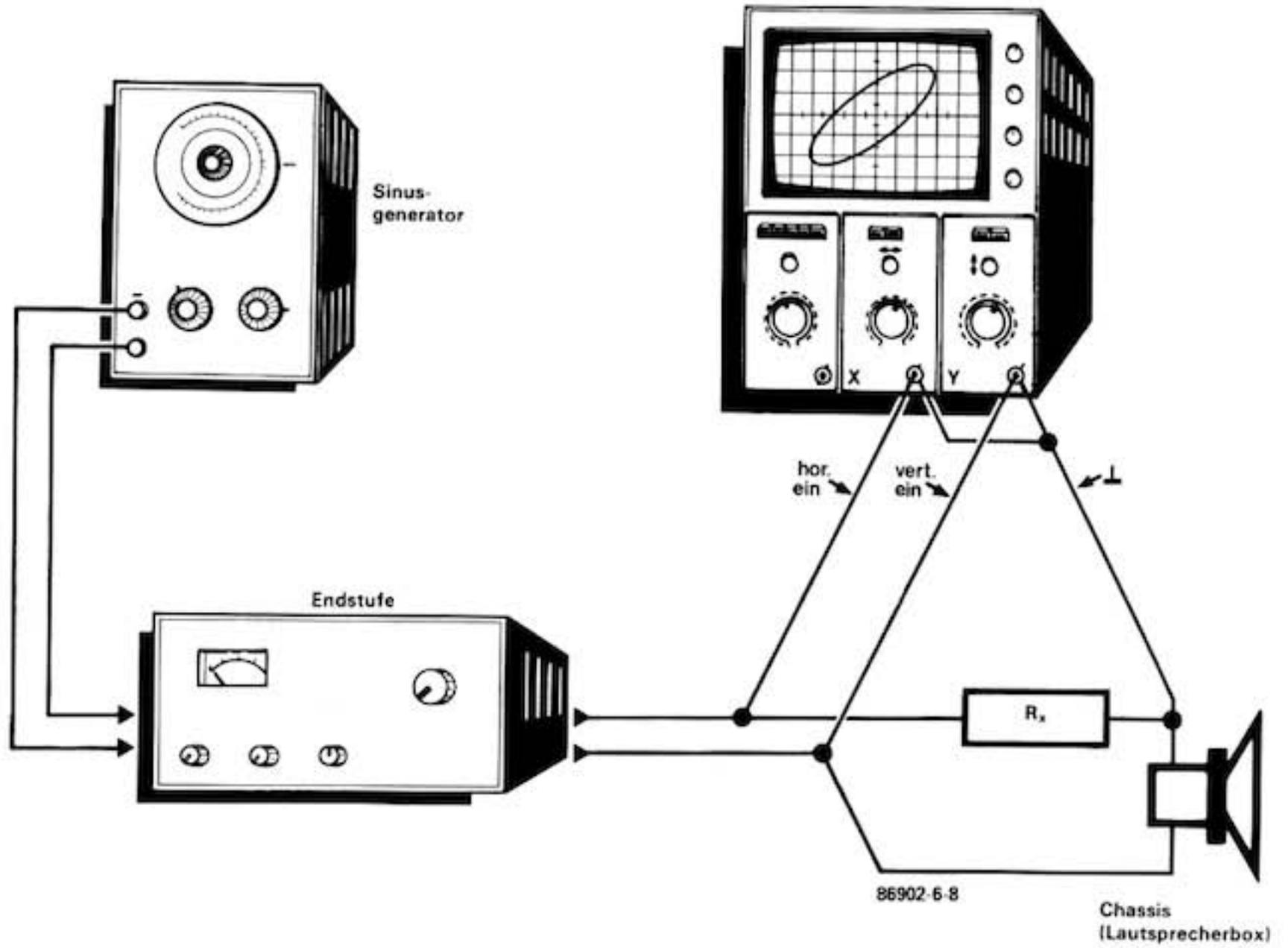
Daneben entfällt der Einfluß der Bodenreflexion. Der Schalldruck sinkt dadurch bei tiefen Frequenzen um 6 dB. Bei einer idealen punktförmigen Schallquelle würde der Schalldruck über den ganzen Frequenzbereich gleichmäßig um 3 dB absinken (doppelte Oberfläche).

Diese Effekte sind aus der Nahfeldmessung nicht direkt ersichtlich; sie lassen sich wohl daraus ableiten. Ebenso ist der Einfluß von Raumwänden auf tiefe Frequenzen nicht durch die Nahfeldmessung zu erfassen. Sie sollten daher immer die Tabelle über die günstigsten Aufstellpositionen beachten bzw. den Einfluß der Raumwände zur gemessenen Kurve addieren.

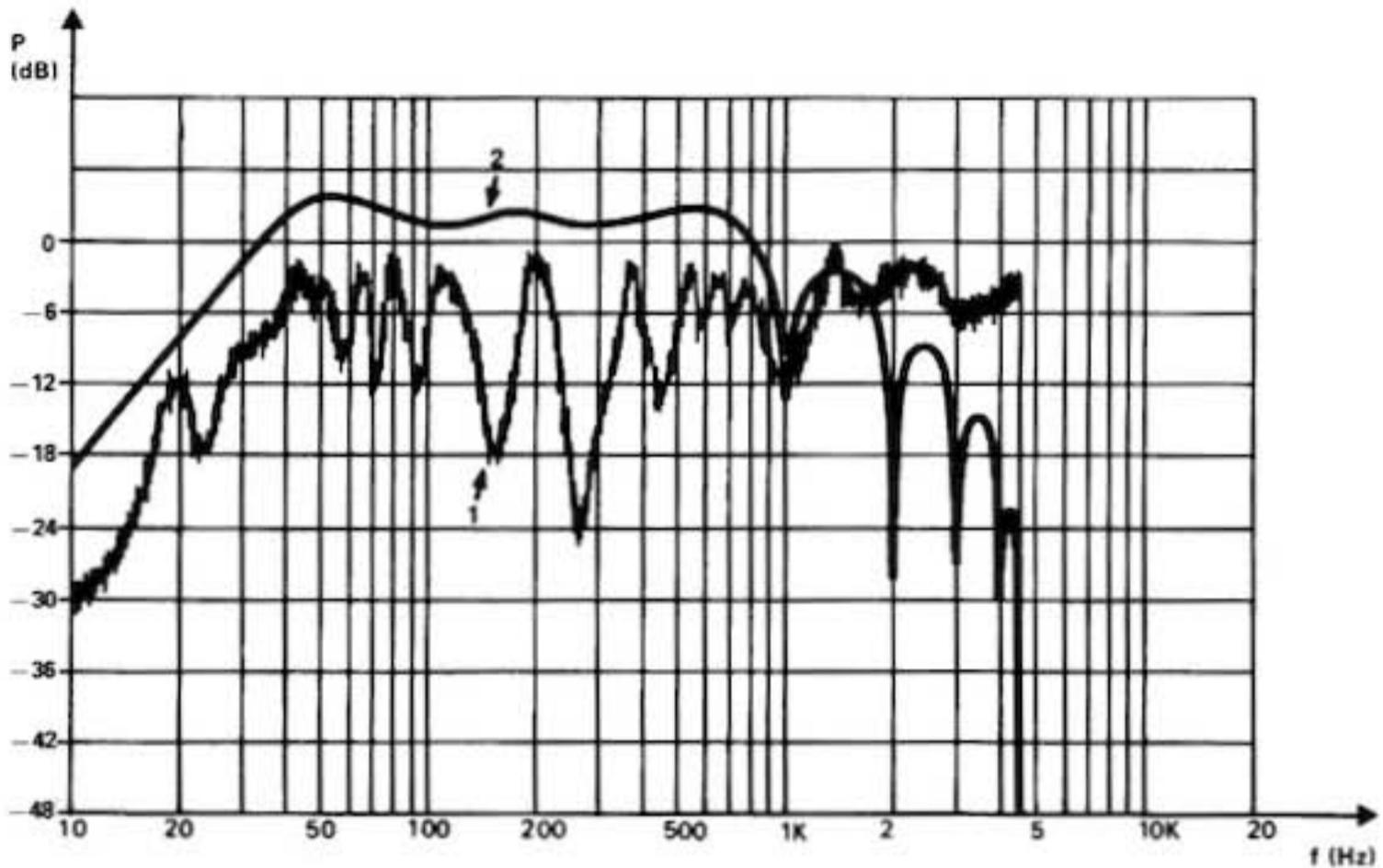
Die gute Übereinstimmung der Nahfeldmessung mit der Kurve für Messungen bei halbkugelförmiger Abstrahlung endet bei Frequenzen, deren Wellenlängen ähnliche Abmessungen wie die Lautsprechermembran aufweisen. Die Kurve in Bild 6.12 zeigt das. Bei einer Frequenz, bei der die Wellenlänge gleich dem Membranradius ist, ist der Schallpegel der Nahfeldmessung auf 0 dB abgesunken. Außerdem zeigt die Hüllkurve für höhere

Bild 6.8. Mit dem Oszilloskop lassen sich Amplitude und Phasenlage von elektrischen Signalen gleichzeitig darstellen. Es entstehen die sogenannten Lissajous-Figuren.

Bild 6.9. Bei der Messung nach dem Konstantspannungsprinzip (Rx etwa 1 Ohm) ändert sich die Breite der Abbildung abhängig von der Impedanz Z.

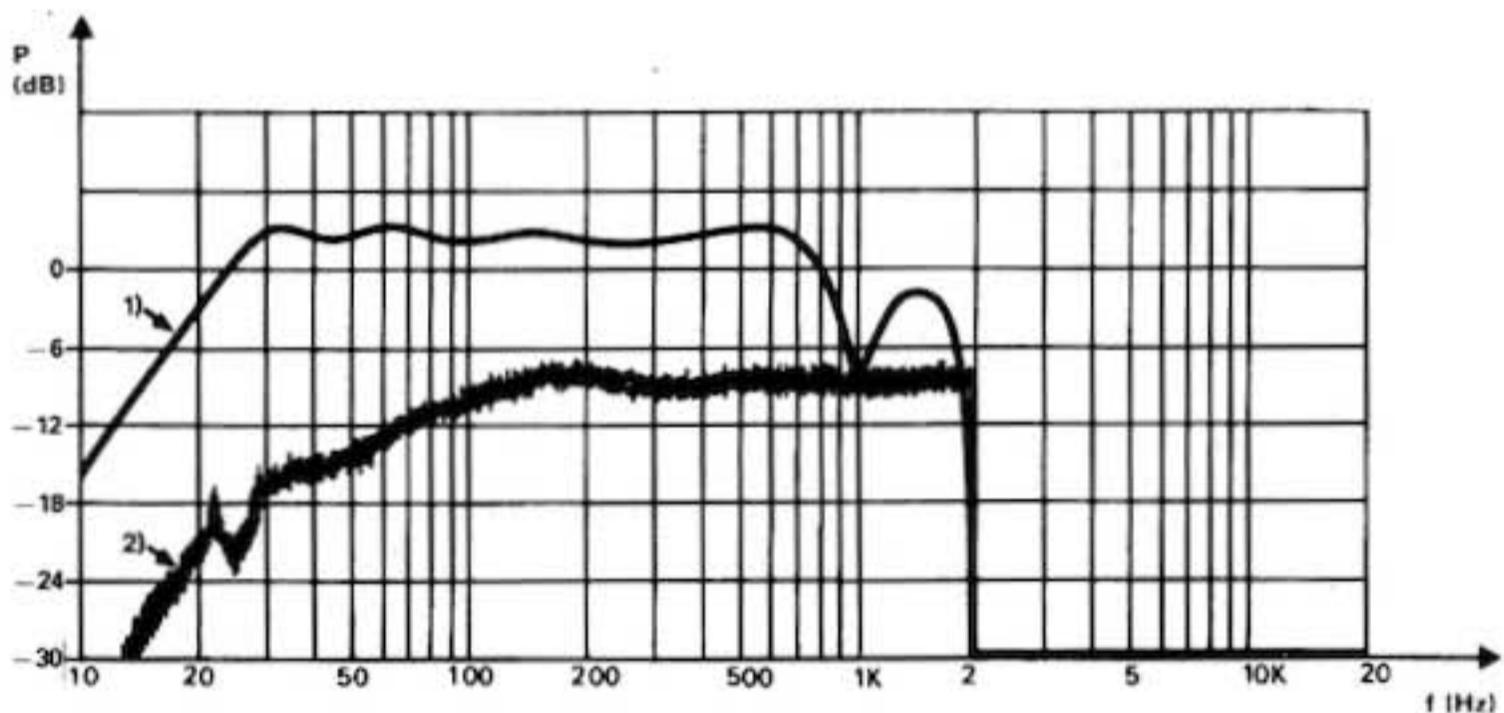


10



86902-6-10

11



86902-6-11

Bild 6.10. Die Kurve der Fernfeldmessung (1) zeigt deutlich den Einfluß der Raumreflektionen, während die Nahfeldmessung (Kurve 2) diese störenden Reflektionen ausblendet. Die Nahfeldmessung liefert so ein Ergebnis über die abgestrahlte Schallenergie.

Bild 6.11. Vergleich einer Schalldruckkurve zwischen Nahfeldmessung (1) und der

Wiedergabekurve für eine kugelförmige Abstrahlung (2). Obwohl die Nahfeldmessung einen linearen Schalldruckverlauf erwarten läßt, sinkt er jedoch zu tiefen Frequenzen hin um 6 dB ab. Das ist kein Meßfehler.

Frequenzen einen mit 6 dB/Oktave fallenden Verlauf. Für genaue Aussagen bei diesen Frequenzen ist die Nahfeldmessung daher weni-

ger geeignet.

Sehr genaue Messungen sind dagegen möglich, wenn es darum geht, den Schallpegel verschiedener Chassis oder eines Tieftonchassis und der Baßreflexöffnung zu vergleichen. Solange das Meßmikrofon deutlich weniger als 1/10 des Membranradius von der Membran entfernt ist, sind die Werte direkt vergleichbar. Bei 1/10 Radius liegen die Meßwerte um 1 dB unter den Werten für geringere Abstände. Bei diesen Messungen muß aber beachtet werden, daß der Radius der Membran selbst über

$$P_n = \frac{P_f \cdot 2a}{r}$$

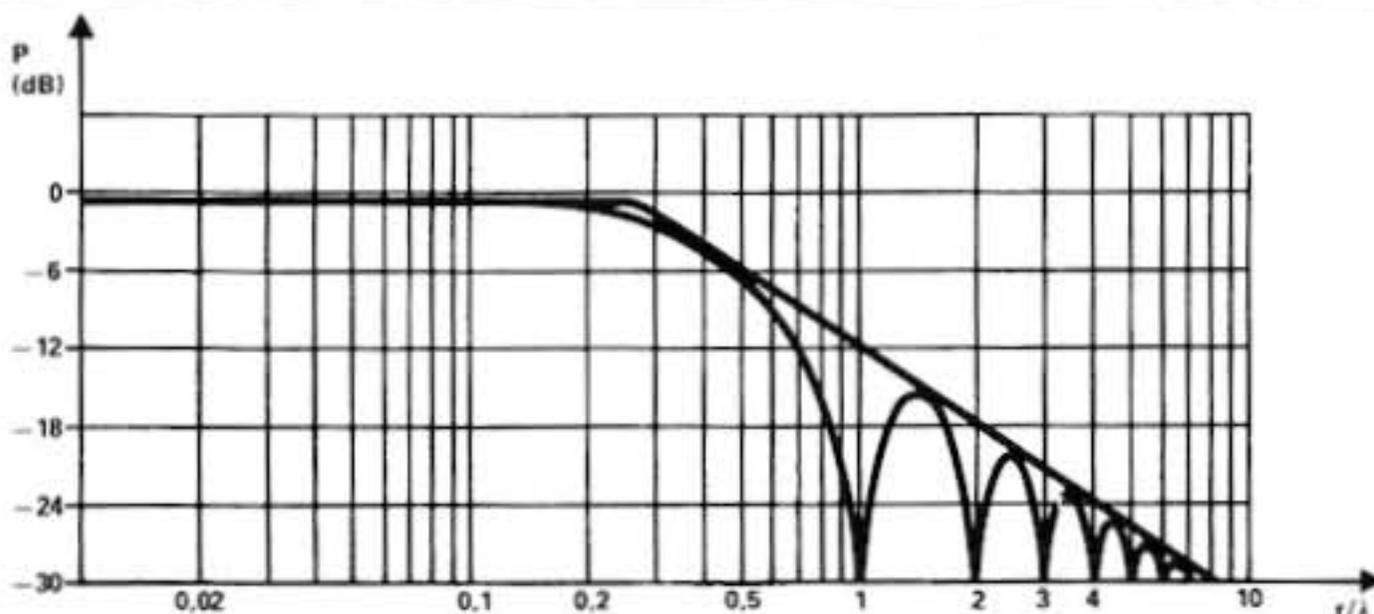
eine Rolle spielt. Für den gleichen Schallpegel im Fernfeld müssen die Nahfeldmessungen verschieden großer Membranen oder Baßreflexöffnungen ebenfalls verschiedene Werte aufweisen. Dabei verhalten sich die Schalldruckpegel (in dB) umgekehrt wie die Quadrate der jeweiligen Radien zueinander. Die kleinere Fläche muß bei der Nahfeldmessung lauter sein. Bei rechteckigen Öffnungen berechnen Sie einfach die jeweiligen Flächen und ermitteln den Pegelunterschied über den Zehner-Logarithmus:

$$P = 10 \log \frac{\text{Fläche 1}}{\text{Fläche 2}}$$

Bild 6.12. Die Nahfeldmessung zeigt für Frequenzen, deren Wellenlänge kleiner als der halbe Membranradius ist, die bekannten Kammfiltereffekte. Zur Messung dieser Frequenzen ist ein anderes Meßverfahren anzuwenden (Gating- oder Ground-Plane Messung).

Messungen an verschiedenen Baßreflexboxen fördern manchmal merkwürdige Dinge zutage. Zum Beispiel eine Baßreflexabstimmung (angeblich) nach Butterworth, bei der fast überhaupt keine Schallenergie aus dem Tunnel abgestrahlt wird (Variovent inkognito). Ein anderes Beispiel sind Baßreflexboxen, die einen großen Teil des Mitteltonbereiches mit abstrahlen, da ihre Form und Position im Gehäuse etwas unglücklich gewählt wurde. Je nach finanziellem Budget können auch mehrere Mikrophone gleichzeitig eingesetzt werden, wobei man deren Signale hinter einem einstellbaren Abschwächer (Mischpult) einfach addiert. So sind die abgestrahlten Signale von mehreren Chassis (und Baßreflexöffnung) mit ihrer Phasenlage in der Messung erfaßt. Das ist besonders bei der Suche nach Linear Phase Response eine große Erleichterung. Laufzeitunterschiede zwischen Chassis, Mikros und Hörplatz sind bei der Interpretation der Ergebnisse natürlich zu berücksichtigen. Neben dieser Nahfeldmessung fehlt jetzt noch eine Meßmethode, mit der eine Schalldruckmessung aus größerer Entfernung und über den gesamten Frequenzbereich möglich ist, ohne das reflektierende Flächen die Messung stören. Hier bietet sich die Ground-Plane Messung an. Bei diesem Meßverfahren müssen Sie die tiefen Frequenzen zwar im Freien messen, aber die Ergebnisse sind genauer, als in den meisten reflektionsarmen (immer schalltot genannten) Meßräumen. Ist die Messung der tieferen Frequenzen nicht so wichtig, weil sie z.B. mit der Nahfeldmethode gemessen werden, dann können Sie auch innerhalb Ihrer vier Wände die Messungen durchführen. Bei der Ground-Plane Messung wird das Mikro-

12



86902-6-12

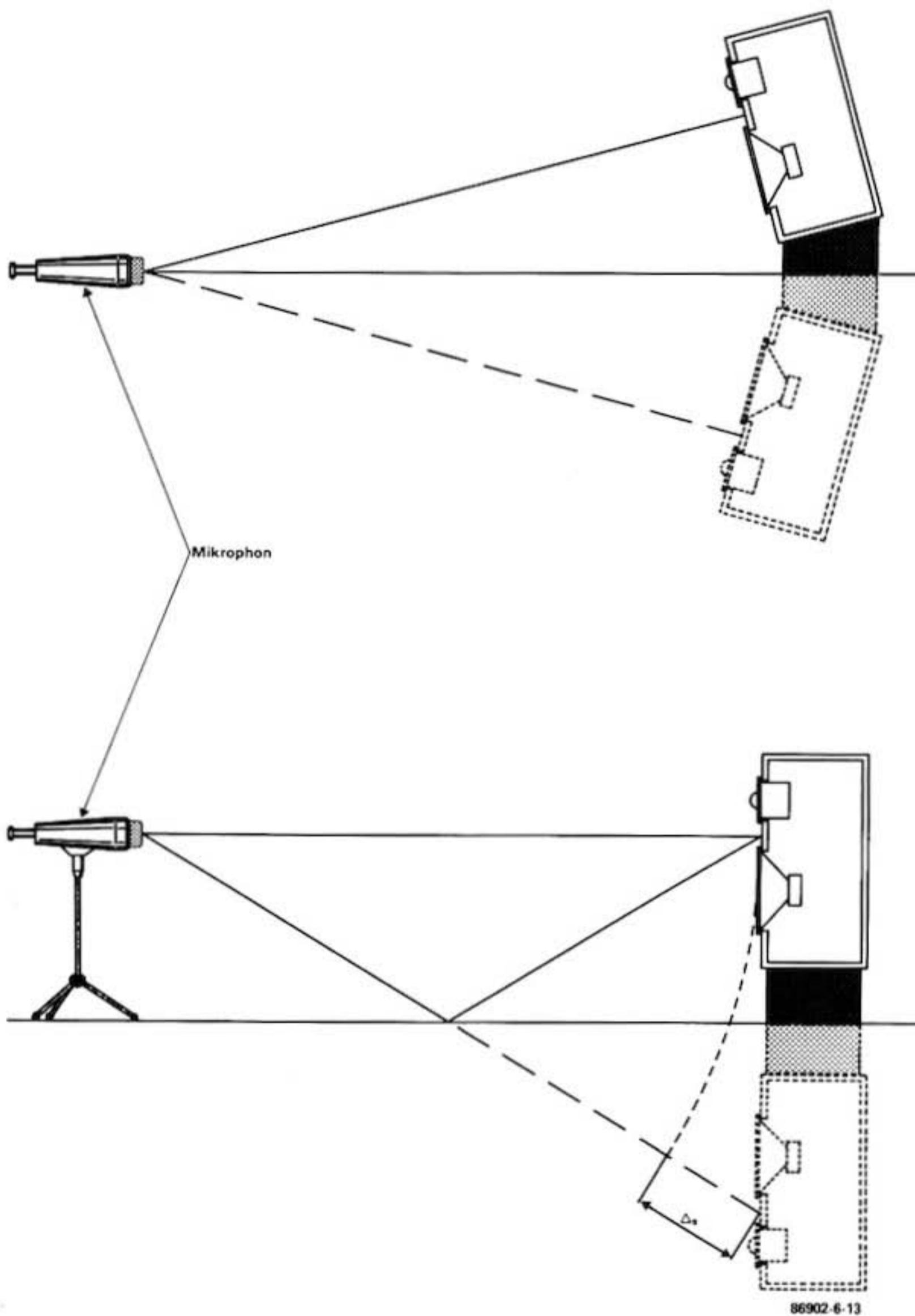


Bild 6.13. Bei dem Ground-Plane Meßverfahren treten keine Phasenfehler zwischen dem Signal der Lautsprecherbox und dem Signal der virtuellen Schallquelle auf. Damit liefert dieses Verfahren auch für höhere Frequenzen sehr genaue Ergebnisse. Bei der konventionellen Messung (mit Mikrofonstativ) verursacht die Laufzeitdifferenz unerfreuliche Meßfehler.

phon unmittelbar auf dem Boden angebracht und die Lautsprecherbox auf einem kleinen Sockel ebenfalls auf dem Boden aufgestellt. Das Mikrofon empfängt jetzt die Signale der Lautsprecherbox und die Signale einer virtuellen Schallquelle (Bild 6.13).

Da hierbei die Laufzeit der Signale von beiden Schallquellen exakt identisch ist, addieren sich die Signale ohne Phasenfehler. Wenn auch die Amplitude beider Signale identisch ist, was einen harten reflektierenden Boden voraussetzt, dann messen Sie genau den Schalldruckverlauf Ihrer Box, nur mit höherem Pegel.

Es sind auch Messungen des Abstrahlverhaltens in der vertikalen Ebene möglich. Dazu wird die Box um 90 Grad gekippt und aus dem gewünschten Winkel gemessen (Bild 6.14).

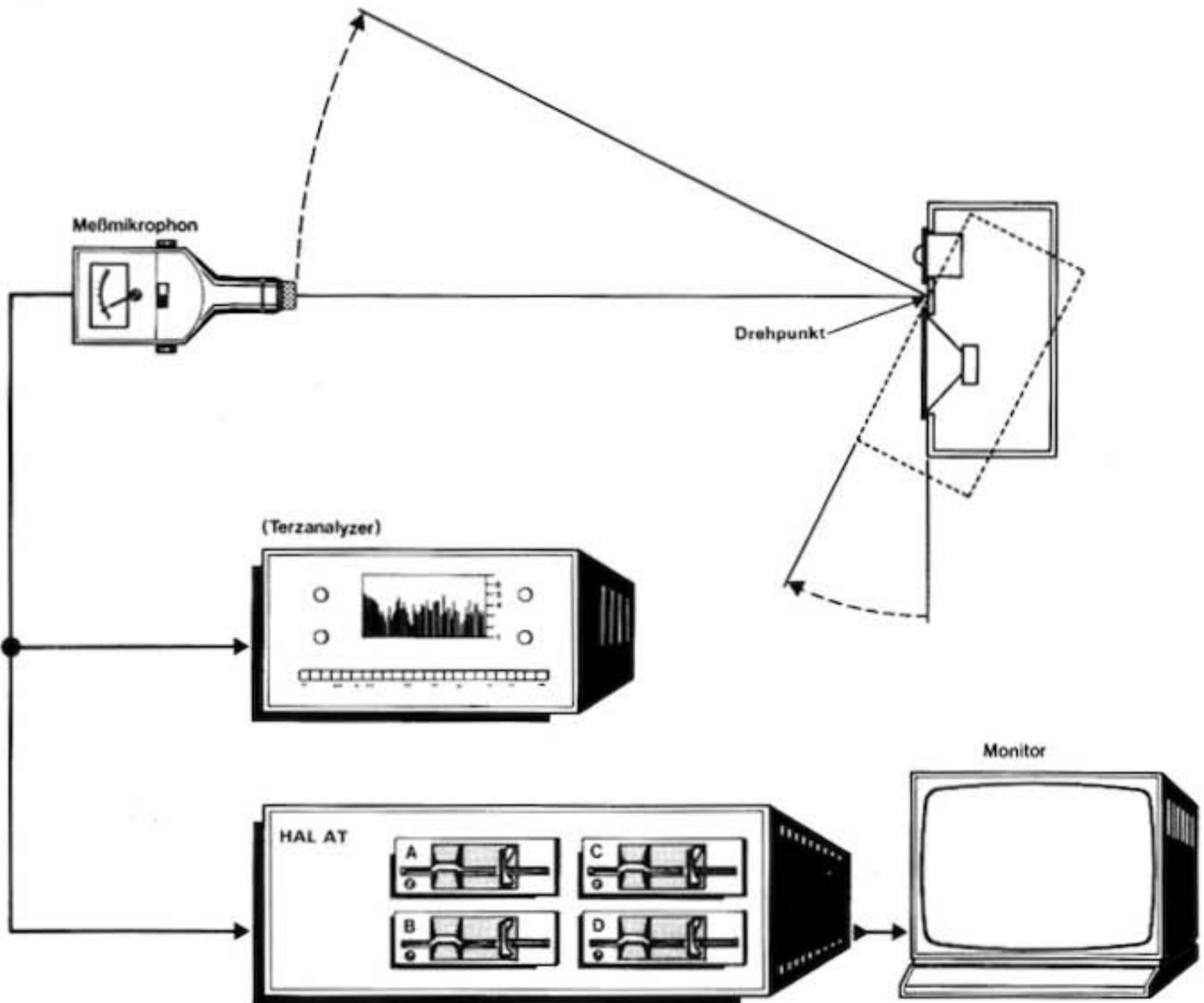
Auch dieses Meßverfahren ist einfach anzuwenden und liefert sehr genaue Ergebnisse. Der kleine Sockel dient übrigens dazu, eine virtuelle Vergrößerung der Schallwand durch die Bodenreflektion zu verhindern. Standboxen sollten daher auch auf dem Boden stehen und nur leicht angewinkelt gemessen werden, während der Sockel bei Regalboxen ruhig etwas höher sein darf.

Achten Sie bei Messungen im Raum darauf, daß die Rückwand die Meßergebnisse bei tieferen Frequenzen beeinflussen kann, wenn der Abstand zum Mikrofon zu gering ist. Sie sollten sich hier durch einige Messungen mit verschiedenen Positionen einen Überblick über die Abweichungen verschaffen.

Noch einige Worte zu den Verzerrungsmessungen an Lautsprecherchassis und Boxen. Lautsprecherchassis erzeugen neben der wiedergegebenen Musik meist größere Mengen Verzerrungen, zumindest verglichen mit anderen Komponenten einer Hifi-Anlage. Dummerweise haben diese Verzerrungen die Eigenschaft, je nach Art und Kombination des Auftretens unterschiedlich störend zu klingen. Die engagierten Lautsprecherhersteller kennen

diesen Punkt sehr genau und wissen seit langem, daß es keinen Sinn hat, ein Chassis auf minimalste Verzerrungen der Art XY zu konzipieren, wenn dadurch andere Verzerrungen verstärkt werden. Wie bei allen anderen Komponenten einer guten Hifi-Kette müssen die Verzerrungen, die eine Lautsprecherbox erzeugt, gegeneinander ausbalanciert sein! Andernfalls kann trotz sehr guter veröffentlichbarer Meßwerte (über weniger gute schweigen sich Hersteller und Datenblätter in der Regel aus) der Klang alles andere als befriedigend sein. Diese unangenehme Erfahrung haben in der Hifi-Szene vor einiger Zeit auch die Hersteller hochwertigster Verstärker machen müssen. Sie haben ihre Produkte mit neuester Entwicklungstechnologie auf geringste harmonische Verzerrungen getrimmt, aber die Klangqualität wurde durch die recht starken Anteile von transienten Intermodulationsverzerrungen (kurz TIM) und einiger anderer, damals weniger berücksichtigter Verzerrungsarten von antiquierten Kollegen weit übertroffen. Noch schlimmer ist es bei den Lautsprechern, da hier gegenüber der Elektronik sehr viel mehr nichtharmonische oder störende harmonische Verzerrungen hoher Ordnung erzeugt werden.

Die sechsten oder siebten Oberwellen des Grundtones sind zum Beispiel sehr viel störender als die zweite Harmonische (erste Oberwelle). Nur werden diese bei Lautsprechermessungen meist geflissentlich übersehen, weil es entweder zu viel Aufwand bereitet sie zu messen, oder die Bedienungsanleitung des Gerätes zu lesen, daß diese Messung vereinfachen würde. Der langjährige Leiter der BBC Forschung für Lautsprecherentwicklungen, Mr. H.D. Harwood, besaß in der Vergangenheit einmal ein Patent für ein solches Meßgerät. Damit war die Messung aller Oberwellen bis zur achten Harmonischen möglich. Leider haben weder die Meßgeräte- noch die Lautsprecherhersteller jemals ernsthaftes Interesse daran gezeigt. Das macht sehr deutlich, in welcher Umgebung Sie sich hier als Hifi-Fan bewegen. Es gibt natürlich auch engagiertere Hersteller, die in der Vergangenheit eigene Meßgeräte entwickelt haben; aber das sind nur wenige. Besonders niedrige Verzerrungen beziehen sich bei den Lautsprechern meist auf k_2 (1. Oberton bzw. 2. Harmonische) und auf k_3 (2. Oberton bzw. 3. Harmonische). Diese sollten ohne Zweifel niedrig sein, aber alle an-



86902-6-14

Bild 6.14. Zur Messung der Abstrahlcharakteristik im beliebigen Winkel neben der Hauptabstrahlachse ist ein drehbarer Sockel erforderlich (man kann auch mit dem Mikrophon umherwandern). In beiden Fällen ist jedoch die Datenflut nur noch mit einem aufwendigen Meßgerät zu bewältigen.

deren auch! Bei einem von Harwood gemessenen Lautsprecher waren als Beispiel zwischen 55 und 59 Hz relative Änderungen der sechsten und achten Harmonischen von 40 dB feststellbar. Innerhalb von 4 Hz sind das Dimensionen, die auch ausgeprägte Membranresonanzen nicht besser hinbekommen. Nach solchen Fehlern müssen Sie selbst in den

hochauflösenden Grafiken der teuersten Fourier-Analyser mit der Lupe suchen; auch mit der Laser-Holographie (genauer Laser-Interferometrie) sind sie nicht zu finden.

Es hat keinen Sinn in puncto Verzerrungen Augenwischerei zu betreiben und Meßverfahren für die einfach zu messenden Verzerrungen aufzuzeigen. Das könnte Sie zu dem gleichen Fehler verleiten, dem schon einige Lautsprecherhersteller aufgesessen sind, dem Versuch, eine Lautsprecherbox allein über Verzerrungsmessungen zu einer guten Box zu machen. Der einfachste Weg zu guten Lautsprecherboxen führt über gute Chassis und diese haben natürlich ihren Preis. Aber gute Chassis renommierter Hersteller sind für Sie die beste Rückversicherung, denn bei der Entwicklung dieser

Chassis haben Profis mit Ohren und Meßgeräten gearbeitet. Selbst eine etwas krumme Schalldruckkurve ist hier kein Manko, sondern nur eine Demonstration ehrlicher Messungen. Schwarze Schafe gibt es überall, also auch bei den teureren Lautsprecherchassis; zu erkennen sind sie relativ schwer. Bei ungewöhnlich glatten Schalldruckkurven ist Vorsicht geboten. Es lassen sich auch Rückschlüsse ziehen, wenn Sie den Werbetext mit dem Chassisaufbau vergleichen; deshalb ist auch der Chassisaufbau ausführlich beschrieben worden. Auf jeden Fall ist eine theoretische Qualitätsbeurteilung von Lautsprecherchassis nicht ganz so einfach.

Bereits im Vorwort wurde gesagt, daß das Buch nicht alle Fragen im Zusammenhang mit Lautsprecherchassis und Lautsprecherboxen beantworten kann. Es ist eine zu komplizierte Materie, weil sie immer und überall andere Probleme aufwirft. Sie verfügen jedoch glücklicherweise über ein Meßgerät, das mindestens genau so gut funktioniert, wie das eines Meßgeräte-Herstellers: das Gehör. Es ist unbestechlich, aber leider etwas träge! Es kann

sehr gut sein, daß bei einem Vergleich zwischen einer neuen Lautsprecherbox und der gewohnten alten Box die neue und bessere Box schlechter klingt, während eine objektiv schlechtere Box besser klingen kann! Das Gehör gewöhnt sich an den lange gehörten Klang einer Lautsprecherbox und als Folge werden alle Fehler dieser Box zuerst als spiegelbildliche Fehler der neuen Box gehört. Dieser Spuk gibt sich aber nach kurzer Zeit; es dauert so 10 bis 30 Minuten. Versuchen Sie deshalb nie, verschiedene Lautsprecherboxen im Schnelldurchgang zu testen. Nehmen Sie sich Zeit und hören Sie bekannte Platten mit Muße und Konzentration. Das präziseste aller Audio-Meßgeräte (das Ohr) benötigt einige Zeit, um sich zu kalibrieren. Dieser Punkt kann hier beim Kapitel über Messungen nicht deutlich genug betont werden. Noch etwas, das bereits mehrfach erwähnt wurde und wichtig genug ist, um es mehrfach zu wiederholen: Suchen Sie sich einen Händler, der Ihnen die Lautsprecherboxen zur Probe mit nach Hause gibt, denn nur dort sind die Hörergebnisse relevant.

"Wie kann ich die klanglichen Eigenschaften meiner Lautsprecherboxen optimieren? Wie sind sie im Raum aufzustellen, damit die Wiedergabe akustisch voll zur Geltung kommt?" Das sind Fragen, die Sie sich sicherlich auch schon gestellt haben, ohne eine befriedigende Antwort zu erhalten.

Das Buch räumt mit allen Ungereimtheiten auf, die durch widersprüchliche Aussagen von Handel und Werbung entstehen. Es beginnt mit den Problemen der (Raum)Akustik wie Aufstellung der Boxen, Frequenzgang, Baßwiedergabe und Richtcharakteristik. Es folgt der Aufbau und die Wirkungsweise von Lautsprecherchassis. Das ist nicht nur eine Auflistung bestehender Systeme, sondern auch eine klare Gegenüberstellung deren Vor- und Nachteile.

Nicht zu kurz kommt die Theorie dynamischer Lautsprecher. Dazu gehören: Übertragungsfunktion, Impedanz, Filter, Hoch-, Band- und Tiefpaß, Frequenzweichen usw. Es folgen Überlegungen zu Baßreflex- und geschlossenen Lautsprecherboxen. Außerdem bietet Ihnen das Buch die Möglichkeit, Lautsprecherboxen sowie die mechanischen Parameter einzelner Chassis elektronisch zu beeinflussen. Schließlich gibt es noch Hinweise und Tips für Messungen an Chassis und Boxen.

Ob Sie nun industriell gefertigte Boxen oder selbstgebaute aufstellen wollen: Mit dem Buch können Sie Ihre Boxen an Ihren Verstärker in Ihrem Hörraum optimal anpassen.

ISBN 3-921608-45-7

Elektor Verlag GmbH, 5100 Aachen