

Kapitel 5

Die Überprüfung von Messtechnik, Chassis und Quellengeräten, Neubestimmung der Thiele-Small-Parameter nach Sicken austausch, Verzerrungen von Chassis 1998 -2001

5. Messungen und Parameterbestimmungen

Auf dem Markt befinden sich verschiedene Quellen für die Audiowiedergabe von professionellen Musikaufnahmen, das sind Schallplattenspieler, CD-Spieler, DVD-Geräte (auch DVD-Audio) und SACD-Spieler nebst Verstärkungselektronik, die bereits im Mittelpreissektor sehr geringe THD Verzerrungen von weniger als 0,008% (-82dB) aufweisen können. Trotzdem bewirken spezielle Maßnahmen bereits in den Quellen hörbare Verbesserungen, die in Richtung Originalität gehen, z.B. durch Austausch von einfachsten elektronischen Bauelementen, wie Koppelkondensatoren, Operationsverstärkerchips und deutlich seltener auch durch Widerstände. Gleiches wird auch in der Lautsprechertechnik unternommen, nur hier kommen noch Spulen hinzu. Trotz fast grenzenloser Vielfalt der Maßnahmen werden keine entscheidenden Ergebnisse erzielt. Das mag vielleicht darin liegen, dass nirgendwo alle bekannten „Tricks“ für die Verbesserung in einem Gerät oder Wiedergabekette angewendet werden. So ist auch festzustellen, dass nirgends alle bislang ermittelten Fortschritte sich in einer Lautsprecherbox vereinen, um ein für alle mal die Frage zu beantworten, ob im jetzigen Stand der Technik die Wiedergabe überhaupt originalgetreu realisierbar ist, wo der Instrumentenkörper und das natürliche Einschwingen hörbar ist wie in einer elektronikfreien „Live“-Darbietung.

Das Problem scheint sehr komplex zu sein, in Anbetracht der objektiven Vielfalt der gegenseitigen Einflussmöglichkeiten und der bisherigen subjektiven erfahrungsgebundenen Berichte und Zielstellungen, die bewusst oder aber unbewusst auch falsch dargestellt worden sein können.

Um die Hauptfrage beantworten zu können, muss abgesichert werden, dass das, was gerade ermittelt worden ist, auch sicher ist und nicht einem logischen Irrtum oder Messfehler unterliegt. Bei jedem Messergebnis muss auch die Frage beantwortet werden, ob denn auch das Ergebnis sinnvoll ist und mit allen anderen Bedingungen zusammenpasst.

Anlässlich der Zerstörung der benutzten Modellbox, die als Mittel diente, den Pfad zum Original zu finden, sollte auch im messtechnischen Bereich noch nochmal die Messmethoden, deren Fehler und die Parameterbestimmungen neu überprüft werden, bevor die Thiele-Small-Parameter nach der Sickenreparatur neu bestimmt werden konnten.

Deshalb wurden zuerst die Messeinrichtungen wie Messmethoden übersichtlich dokumentiert und bewertet, um anschließend die Thiele-Small-Parameter Neubestimmung durchführen zu können. Dabei sollen eigene Messerfahrungen festgehalten werden.

5.1. Die Messgeräte

5.1.1. Schallmessung

Für die akustischen Messungen wurde ein 1/2" Mikrofon von Brüel&Kjaer 4134 mit 200V Vorspannung und ein Präzisionsschallpegelmeßgerät 2235 im Akkubetrieb („warm up“ nur 5min) aus dem Jahre 1992 auf Stativ genutzt. Die von Brüel&Kjaer nachgemessenen Eichkurven im Jahre 1997 sind in Abb. E1 und E2 dargestellt.

Der Rückgang der Hochfrequenzverstärkung in E1 ist eine unerklärliche Schwäche für ein so hochwertiges Gerät.

Es gibt auch eine Angabe zur Resonanzfrequenz (s. Kapitel 2. Derartige Resonanzen sehen denen von Lautsprecherchassis recht ähnlich, dort sind sie mit elektrischen Phasenänderungen bis 50° verbunden. Wenn hier analoge Zusammenhänge existieren sollten, dann sind auch die Resonanzfrequenzen, die für Mikrofone normal und zulässig sind, verständlich und zusätzliche Phasenverschiebungen sind zu erwarten. Ein aufmerksames Lesen der Datenblätter bestätigte den Sachverhalt der Phasenabweichungen im Resonanzbereich (s. Tab.1). Nur stimmte die Resonanzfrequenz nicht mit dem Empfindlichkeitsmaximum überein. Aber in der

Resonanzfrequenz von 23kHz wurde eine Phasenabweichung von 90° ausgewiesen. Besser wäre noch eine Phasengangskurve. Hoherfreulich und beruhigend sind dagegen die Angaben für Langzeitstabilität, wenn das Mikrofon normalen Umweltbedingungen ausgesetzt ist und der niedrige Temperaturkoeffizient.

Abb.1: Eichkurve Pegelmesser Brüel&Kjaer 2235

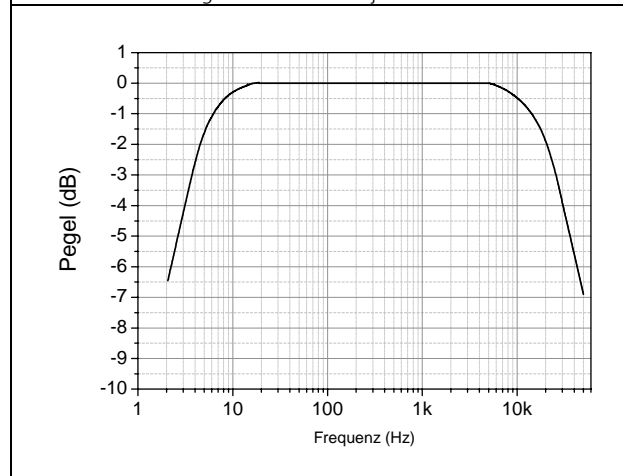
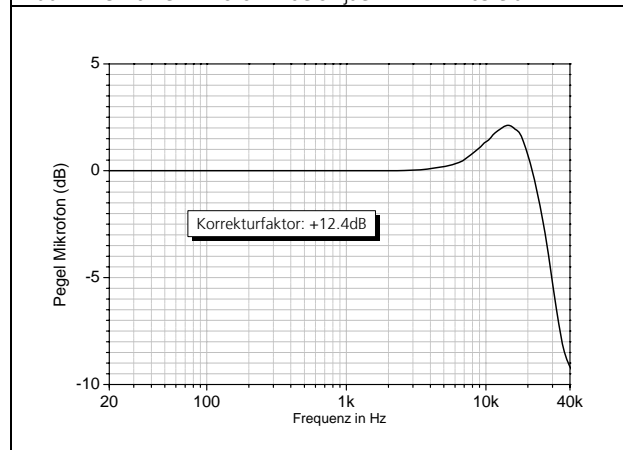


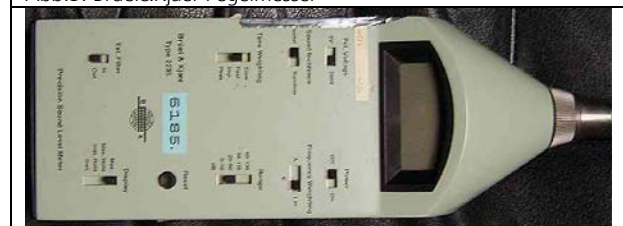
Abb.2: Eichkurve Mikrofon Brüel&Kjaer 4134 Diffusfeld



Tab.1: Spezifikation Mikrofon

Korrekturfaktor	+12,4dB
Diaphragma Resonanz	23kHz (90° Phasenabweichung)
Druckkoeffizient	-0,0007dB/hPa @ 250Hz 1013hPa
Temperaturkoeffizient	-0,002dB/°C @ 250Hz -10...50°C
Langzeitstabilität	>1000 Jahre/dB @ 20°C

Abb.3: Brüel&Kjaer Pegelmesser



5.1.2. Impedanzmessung

Für die elektrischen Messungen im AC-Mode wurde wie in Elektor das Precision LCR Meter von Hewlett-Packard HP 4284A (1993) verwendet, zusätzlich stand das HP4285A (1993) zur Verfügung. Letzteres wurde über ein 2-jährigen Kalibrierzyklus vom Hersteller überwacht. Nachdem HP seine Messgerätfertigung abgegeben hat

übernahm AGILENT die Betreuung. Dann allerdings wurde die 4284A nur ab 1kHz kalibriert, darunter wäre die Einstellung zu kostenintensiv gewesen. Ansonsten gab es eine Selbstkalibrierung mit den Modi OPEN/SHORT/LOAD, bei dem die Einflüsse von Zuleitungen zum Testobjekt berücksichtigt werden und nicht in die Messwertbildung einging.

Es wurde immer die Impedanz Z in Ω und die elektrische Phase θ in $^\circ$ bestimmt, daraus konnten mittels verschiedener Grundmodelle die Folgegrößen berechnet werden, bzw. auch am Gerät direkt angezeigt werden. Folgegrößen waren u.a. C, D, L, R, Q, G mit Indizes s oder p für seriell oder parallel.

Die HP 4284A sah genauso wie die HP 4285A aus, nur dass die Grenzfrequenzen anders waren.

Für die Kalibrierung in SHORT wurden die Kontakte immer mit Glasfaserstift gereinigt und wenn nötig großflächig ausgelegt. Für das DUT 16047A stand z.B. eine großflächige Messingbrücke zur Verfügung mit der die Kalibrierung erfolgen sollte. Die Oberfläche des Messings wurde mit der Zeit dunkel und schlechter leitfähig. Mit dem Glasfaserstift wurde sie wieder hellgelb. Auch die Edelstahl-Aufnahmeclips des 16047A mussten ab und zu gereinigt werden, damit auch der großflächige Kontakt unter $0,01\Omega$ kam. Die Kontaktklemmen im DUT waren hartvergoldet und klemmten die Edelstahlaufnahmen für die Bauelemente.

Tabelle 2: Daten Impedanzmessgeräte

	HP 4284A	HP4285A
Frequenzen	20Hz-1MHz	75kHz-30MHz
Genauigkeit	<0,05%	<0,1%
Spannungsquelle	0,005...20Vrms	2Vrms
Impedanz	0,01m Ω ...99,9M Ω	0,01m Ω ...99,9M Ω
Bauelementeadapter	16047A	16047A

Abb.4: HP4285A Impedanzmessung



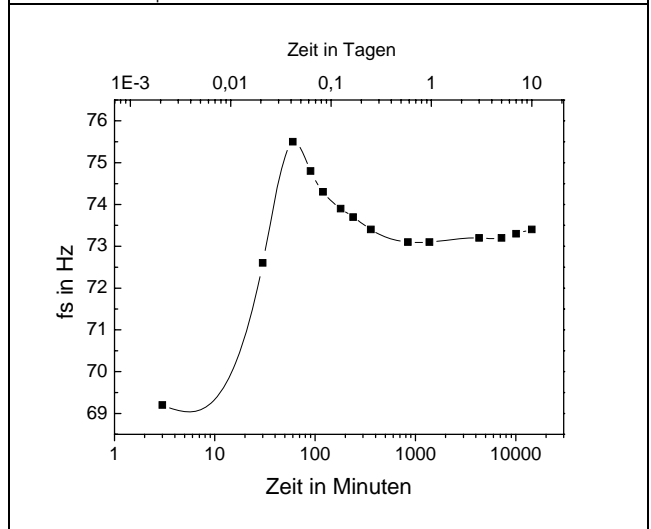
Die HP 4284A sah genauso wie die HP 4285A aus, nur dass die Grenzfrequenzen anders waren.

Für die Kalibrierung in SHORT wurden die Kontakte immer mit Glasfaserstift gereinigt und wenn nötig großflächig ausgelegt. Für das 16047A stand z.B. eine großflächige Messingbrücke zur Verfügung mit der die Kalibrierung erfolgen sollte. Die Oberfläche des Messings wurde mit der Zeit dunkel und schlechter leitfähig. Mit dem Glasfaserstift wurde sie wieder hellgelb. Auch die Edelstahl-Aufnahmeclips des 16047A mussten ab und zu gereinigt werden, damit auch der großflächige Kontakt unter $0,01\Omega$ kam.

Der „warm up“ wird vom Hersteller mit <30min Stunden empfohlen. Um sicherzugehen, ab welcher Inbetriebnahmezeit der Fehler ausreichend gering war, wurden Impedanzmessungen von 40s Dauer an dem Tiefmitteltöner der BR25 im Resonanzbereich f_s 73Hz \pm 10Hz mit rund 0,1Hz Step durchgeführt. Das Chassis war über Jahre praktisch täglich bis zuletzt im Gebrauch gewesen und ruhte über das Wochenende (1 Jahr vor dem Ausfall). Der Fehler in den ersten Stunden nach Inbetriebnahme des HP4284 war beträchtlich. Er ist größer als die Voralterungsänderung aller bisher gemessenen neuen Chassis. In der Grafik wurde der zeitliche Verlauf der gemessenen f_s aufgelistet. Minimal ist also eine Messung nach 14h Inbetriebnahme der Messbrücke durchzuführen. Bei sehr langen Betriebszeiten drifft das Gerät dann aber wieder etwas weg.

Das in der Tabelle „warm up“ angegebene Verhalten ließ sich für die ersten 3 Tage wiederholen, die weitere Änderung über 73h hinaus wurde nicht noch einmal verfolgt.

Abb.5: warm up HP 4284A fs an 7101 BR25



Befindet sich das Gerät im eingeschwungenen Zustand nach 24h und man misst Elektrolytkondensatoren unter DC, verhalten sich diese analog. Ist das Messgeräteverhalten den Elektrolytkondensatoren in den Schaltungen des Messgerätes selbst zuzuordnen?

Dass hier ein Zusammenhang besteht, kann man auch vermuten, wenn man die „Klangqualität“ des Marantz PM80 mit der Zeit nach dem Einschalten verfolgt. Gleich nach dem Einschalten klingt es passabel, danach einige Stunden unangenehm hell, nach einem Tag angenehm stimmig „warm“, der Zustand bleibt so einige Tage. Nach 1 Woche scheinen mehr die höchsten Frequenzen zu fehlen und abermals nach 1 Woche klingt es schon recht dumpf. Einige Stunden genügen bis zur vollständigen Abkühlung und dann geht alles wieder von vorn los. Wahrscheinlich ist, dass die Temperaturfunktion alles noch verstärkt.

5.1.3. DC-Quellen-Messungen

Für die DC-Mode Bewertungen kamen Messgeräte von Keithley zum Einsatz: Electrometer 617 bis 1999 und danach 6517A, SMU 236/7 (1996) und DMM 2000 (1997) nebst Zubehör. Die Verfügbarkeit der 237 mit max.1000VDC Quelle und einer Strom-Compliance von 10mA war leider selten.

Abb.6: Keithley SMU 236



Abb.7: Keithley 6517A (vorher 617)

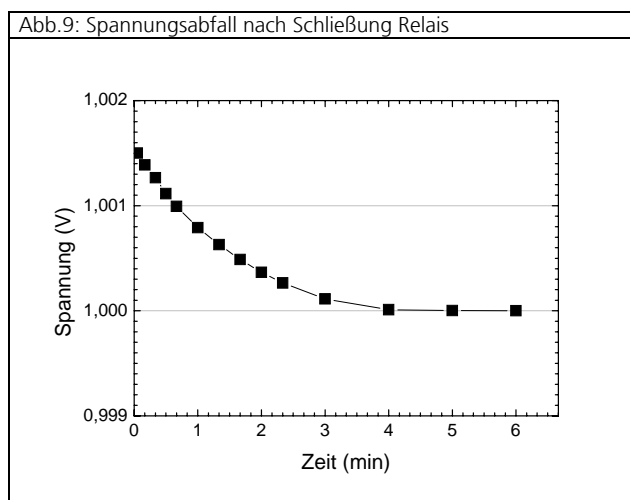


Abb.8: Keithley DMM 2000



Auch diese Messgeräte benötigten im allgemeinen ein „warm up“ von mindestens 2 Stunden. Das war unter anderem daran zu erkennen, dass die Messwerte von Messwiderständen mit 0,1% Genauigkeit ähnlichen Zeitfunktionen wie oben unterlagen. „warm up“ Schwankungen von 1% für niederohmige ohmsche DC-Widerstände $<20\Omega$ waren keine Seltenheit.

Am DMM 2000 war doch etwas überraschend bemerkt worden, wie empfindlich Kontaktwiderstände auf die Zusammenführung metallischer elektrischer Leiter reagieren und streuen können. So reagieren auch Relais mit veränderlichen Spannungsübertragungen. So wurde auch immer eine Klangänderung nach Schließung der Lautsprecherrelais im MARANTZ PM80 vernommen, ebenfalls für etwa 2 bis 3min, aber eine Vorstellung über die Ursachen war bisher völlig als Spinnerei abgetan worden. Unter der Voraussetzung, dass die sich die Differenz zur Sollspannung im PM80 analog zum im Messaufbau mit einem echtem TAKAMISAWA Lautsprecher-Ersatzrelais verhält (s. Abb.9), befand sich die Klangänderung etwa bei -56dB bis -65dB. Damit wäre der Hörsinn bei akustischen Einschwingvorgängen empfindlicher als bei dem vorhergehenden Vergleich mit reinen Sinussignalen.



Tab.3: Daten Keithley Geräte

Gerät	Quelle	Messung
SMU 236 (237)	1pA...100mA	0,1mV...110V
	Impedanz	$>10^{14}\Omega < 20\text{pF}$
		$>10^{14}\Omega < 20\text{pF}$
	0,1mV...110V (1100V)	30fA...100mA
6517A	$\pm 1000\text{V}$	1fA...20mA
		10 μV ...200V
		50 Ω ... $10^{16}\Omega$
Resolution		6.5 Digits
DMM2000	DC	100nV...1kV
	True RMS	0,1 μV ...750V
		3Hz...300kHz
Resolution		6.5 Digits

Gewöhnlicherweise wurden diese Messgeräte im Labor ja auch Montags früh angeschaltet, Messungen erfolgten ab Mittag und danach wurden sie jeden weiteren Morgen kontrolliert bevor sie am Freitag nachmittag wieder ausgeschaltet wurden. Bei den Triaxialkabeln wurde der innere Schirm mit einem leistungsarmen Signal belegt, um so die Kabelkapazität zu minimieren.

Tab.4:

	Verkabelung
SMU 236 (237)	Triaxial
6517A	Triaxial, BNC, Banana
DMM2000	Banana, Adapter, BNC

5.1.4. Digital-Spektrum-Analyzer

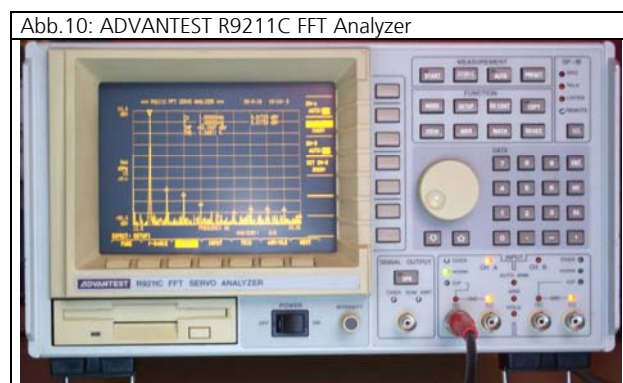
Bei sensorischen Messungen wurden Spektrum-Analyzer von ADVANTEST von 1992 aus dem HP-Vertrieb verwendet, mit dem

auch harmonische Verzerrungen gemessen werden konnten. Die Messdynamik betrug 90dB, da die Messgenauigkeit mit 16Bit begrenzt wurde. Der Eingangswiderstand betrug $1\text{M}\Omega$, was viele Messaufwände verringerte.

Tab.5: Technische Daten R9211C

Messparameter	
Eingangsimpedanz	$1\text{M}\Omega/100\text{pF}$
Eigenrauschpegel	0,5 μV (-125dBV)
Frequenzbereich	10mHz bis 100kHz
Vollaussteuerung	-60dBV bis 30dBV
Sourceparameter	
Sinus, Swept- u. Multi-Sinus,	
Ausgangsimpedanz	$<1\Omega; 50; 600\Omega$
Ausgangspegel	$\pm 2\text{mV}$ bis 15V, 100mA

Das Gerät basierte auch eine Servoquelle für Frequenzgangmessungen und einen Differenzeingang. Die Speicherung auf Diskette erfolgte leider nicht im ASCII-Format. Zum schnellen Erfassen der Messdaten konnte auf einem Thermodrucker im Gerät das Spektrum ausgedruckt werden. Darüberhinaus waren bis maximal vier Koordinatenfenster gleichzeitig abbildbar, z.B. Amplitude und Phase.



5.2. Chassis-Messungen mit Höreindrücken

Die Messung der Chassis konnten nur im Wohnzimmer mit reinen Dauersinussignalen (1 Sekunde) von verschiedenen Quellen durchgeführt werden, d.h. Reflektionen von Möbeln und Wänden gehen voll ein. Obwohl die bisherigen Messungen weder in einem „Schalltoten Raum“ noch mit den üblichen Impulsmessungen erfolgten, schienen die Ergebnisse vernünftig gewesen zu sein, wie z.B. die gemessene gerade Schalldruckkurve der Original-BR25. Aber das war eine Mutmaßung. Da die Originalmesswerte der BR25 Chassis nicht bekannt waren, mussten von neuen Chassis die veröffentlichten Messwerte nachvollzogen werden und geprüft werden, ob die gewählten Messanordnungen keine zu großen Fehler machten. Geeignet für das Gehäuse waren nur 13er Tiefmitteltöner und normale Kallottenhohtöner, die mit einigen Hilfsmitteln eingepasst werden konnten.

Bevor die akustischen Messungen ermittelt worden sind, wurden immer die elektrischen Impedanz- und Phasengänge aufgezeichnet. Bereits an der RCL-Messbrücke HP4284A konnte man ab 20Hz einen ersten störstellenbezogenen Höreindruck gewinnen und grobe Fehler erkennen. Mit Störstellen sind die Unregelmäßigkeiten im elektrischen Phasengang bezeichnet. Manchmal bildeten sich Reflektionen oder magnetische Umweltfaktoren sich im Impedanzgang ab, sie waren erst erkennbar, nachdem sie beseitigt wurden. Im Vergleich zu den Mikrofon-Messungen sollte sich ein wesentlicher Zusammenhang zwischen den elektrisch gut messbaren Phasen-Störstellen, d.h. Resonzfrequenzen, und groben akustischen Störstellen, lästige Verfärbungen von Tönen und andere unangenehme nicht beschreibbare Hörwahrnehmungen sowie harmonische Verzerrungen ergeben.

5.2.1. Tonquellen

Da der R9211C anfangs kaum zur Verfügung stand, wurden anderweitige Tonsignalgeneratoren für die Hör- und Messversuche

gesucht, die bequem und sicher handzuhaben waren und modernere Ansteuerqualitäten als z.B. ein per Hand durchzustimmender RC Röhrentongenerator GF2 (CLAMANN & GRAHNERT Dresden 1965 RC Generator 16Hz-25kHz). Da musste man schon etwas feinfühlig sein, wenn man die richtige Frequenz treffen wollte.



Abb.11: RC Röhrentongenerator GF2

Die Messschallplatte LB211 ist vom Tonumfang wie von der Signalqualität über den Plattenspieler ja nicht die 1.Wahl, da waren die Unterschiede über CD ja schneller bemerkbar. Die erste Test-Ton CD war eine von CONRAD. Der Tonumfang war zwar nicht umfassender aber qualitativ besser. Eine spätere Messung zeigte ein Klirrdiagramm wie im Foto Abb.10. dargestellt ist. Es war ein gleichmäßig abfallendes bis k_5 und betrug 0,048%. Nun wiesen die HiFi-Zeitschriften und das Herstellerprospekt für den MARANTZ CD72 nur ein THD von weniger als 0,002% aus. War die CONRAD CD so schlecht? Im Vergleich zum 1kHz Ton des Pegelprüfgerätes von BRUEL & KJAER klang sie verzerrter. Wegen des geringen Tonumfanges kam die Soundtest CD von Völkner mit 46 Testfrequenzen noch dazu. Diese klirrte aber noch mehr. Mit dem Bedürfnis saubere Testfrequenzen ähnlich dem BRUEL & KJAER zu haben, wurden solche in MATHEMATIKA synthetisiert und auf CD gebrannt. Es konnten 96 Frequenzen im logarithmischen konstanten Abstand von 20,6kHz bis 13,8Hz aufgenommen werden. Diese Klänge in der Tat sauberer als die anderen Quellen. Später emitierte STEREOPLAY eine Test CD, deren Töne noch sauberer wirkten, aber die Testtöne waren für das Messen zu kurz. Der Klirr der beiden letzten CD waren am R9211C unterhalb der praktischen Messgrenze von weniger als 0,02%, die durch den Rauschteppich von -85dB definiert wurde. Die Amplituden der entsprechenden harmonischen Frequenzen des Rauschens wurden mitgezählt. Zwischen Messsignal Spitze und oberer Messgrenze des Analyzers mussten mindestens 2 bis 3dB Headroom gesetzt werden, da ansonsten der Klirr zunahm.

Tab.6: Daten von Tonquellen

	Pegel	U	f	THD
CONRAD Test CD	6dBV	2V	1,000kHz	0,048%
GF2 "kmin"		1V	1,000kHz	0,160%
VÖLKNER Soundtest	3,2dBV		1,000kHz	0,750%
MATHEMATIKA 4	5,5dBV		1,027kHz	<0,02%
STEREOPLAY CD 1997				<0,02%
DAT	6dBV	2V		<0,1%

Entgegengesetzt der landläufigen Meinung damals, dass Klirr unter 0,1% nicht hörbar ist, musste widersprochen werden. Nun ja, vielleicht nicht absolut, aber mit Sicherheit unmittelbar nacheinander.

Eine ganz andere Tonquelle wurde mit dem DAT genutzt, dort wurden 277 Messtöne an der HP4284A von 20Hz bis 25kHz aufgenommen.

Zunächst waren die Messungen mit leicht unterschiedlichen Mikrofonstellungen sekundenweise gemessen worden und dann gemittelt, später wurde die Tondichte schrittweise erhöht und die Stellungen dann schließlich nicht mehr verändert und dafür wurde im ORIGIN die Amplitudenverläufe über FFT-Filter geglättet. Noch etwas später wurde ein höherwertiger Sinusgenerator (Abb.12) und Fluke-Multimeter (Abb.13) für die automatische Messung verwendet.

Es handelte sich also um eine quasi Tauertonmessung im Diffusschallfeld mit einem entsprechend geeichten Mikrophon. Im Sekundentakt konnte ganz gut so das akustische Verhalten der Wiedergabekette an Sinustönen gemessen und gehörmäßig beurteilt werden. Schließlich konnten auch ohne Anwesenheit der Pegel auf 1W gedreht werden und automatisch gemessen werden. Der Lautstärkeindruck von 87dB in 1m Entfernung war selbst 4m weg einfach zu laut und ohne Hörschutz nicht zu ertragen gewesen. Musik bei voll ausgesteuerten CD's hatten bei weitem nicht diese Lauthheit. Was die normale Musik dahin kennzeichnet, das sie im wesentlichen aus Pausen besteht.



Abb.12/13: Sinusgenerator/Fluke Multimeter

5.2.2. Einige Vergleiche zur Literatur

In Anbetracht dessen, dass immer die Gefahr bestand, die 20 Jahre alten Chassis zu verlieren, wurden bereits immer wieder mal vielversprechende aktuelle Hoch- und vor allem Tiefmitteltöner, die in das BR25-Gehäuse eingebaut werden konnten, getestet und gemessen. Die im folgenden charakterisierten Chassis waren nur eine Auswahl von etwa 4 mal sovielen tatsächlich getesteten Chassis. Im Unterschied zur Literatur werden die Impedanzkurven logarithmisch dargestellt, um die Störungen effektiver sichtbar zu machen, der Höreindruck ist ja auch logarithmisch vom Schalldruck abhängig. Die Impedanzen und elektrischen Phasen wurden unter Freiluftbedingungen gemessen, die Schalldruckamplituden im freistehenden BR25-Gehäuse in der Mitte 1m vor der Blumenbank (Kap.4, Abb.1, der Sessel wurde weggeräumt).

Für die Bewertung der privaten Messmethode musste ein bekanntes Chassis herangezogen werden, da für die der BR25 keine Kurven zu erhalten waren. Ein Chassistest erfolgte mit einem Görlich 130AR0. Der Görlich 130AR0 war eine OEM Spezialanfertigung und wies Belüftungen sowohl hinter der Staubschutzkappe als auch hinter der Schwingspule auf. Bemerkenswert war die symmetrische Schwingspulenführung. Die meisten anderen Chassis hatten ihre Zuführungen einseitig, was zu einer vorzeitigen Taumelung der Membran führte (bei niedrigeren Frequenzen als symmetrischer Anordnung) und damit zu einer unnötigen Einengung des Übertragungsbereiches.

Tabelle 7: Erklärungen für Abb.14

Zeichen	Merkmal	Ursache
M	Schalldruckamplitudenschwelligkeit	Person in Mikrofonnähe
R1	Resonanz No.1	Chassisresonanz
R2	Resonanz No.2	Chassisresonanz
F	Absinken des Schalldrucks	Bündelungsfrequenz
A	Anhebung des Schalldrucks	Membranaufbrechen

Die Box wurde auf einen Ständer aus Eiche-Massivholz in 2cm Dicke mit Spikes und rechteckiger Abdeckplatte gestellt, dessen Säule einen dreieckigen Querschnitt (Seitenlänge 15cm) für eine Quarzsandfüllung hatte. Die Dreieckspitze zeigte zur Front. Die Basisplatte am Boden besaß auch Spikes. Der 80cm hohe Ständer stand vor einer Raumecke mit einem Abstand von 1 zur schmalen Zimmerrückwand und 1,3m zur linken Zimmerseitenwand.

In Tabelle 7 sind die in Abb.14 gekennzeichneten Merkmale gelistet. Obwohl der konkrete Aufbau des Görlich 130AR0 anders ist als der von „Hörmal“ [1] vermessene 130/25-8VK sind doch gewisse prinzipielle Ähnlichkeiten vorhanden. Der Schalldruckpeak in Abb.15 korreliert mit einem elektrisch resonanzfreien Aufbrechen der Membran in der Zone A der Abb.14. Die Bündelungsfrequenz zeigt ihre ideale Wirkung, da ja keine Staubschutzkalotte vorhanden ist. Die elektrischen Resonanzen R1 und R2 sind Nebenresonanzen und

scheinen sich trotz der Welligkeit im Amplitudenspektrum widerzuspiegeln. Diese Resonanzen sind auch in der Impedanzkurve von „Hörmal“ Abb. 16 zu sehen, wobei R1 etwas verschoben ist. Die oberen Resonanzen sind bei der Neuentwicklung nicht zu finden. Die stark ausgeprägte R1, in Abb.14 identisch mit Abb.16 führt wahrscheinlich zu der in Abb.15 ersichtlichen Ausschwingverzögerung, bei der sich die 1,7kHz Startresonanz in die halbe Wellenlänge 850Hz ausreagiert. R1 wird durch die Hohlraumresonanz zwischen der Membran innerhalb der Schwingspule und der Schwingspulenbelüftung (Helmholtzresonator) erzeugt. Diese Nebenresonanzen R1 und R2 sind auch in der Impedanzfunktion gut sichtbar zu machen, wenn sie logarithmisch skaliert wird. In den kleinen Impedanzspitzen wendet sich die Phasenkurve von konvex nach konkav nach aufsteigenden Frequenzen hin. Man kann dies als Phasenwende bezeichnen.

Abb.14: Schalldruck-Impedanz-el.Phase Görlich 130AR0

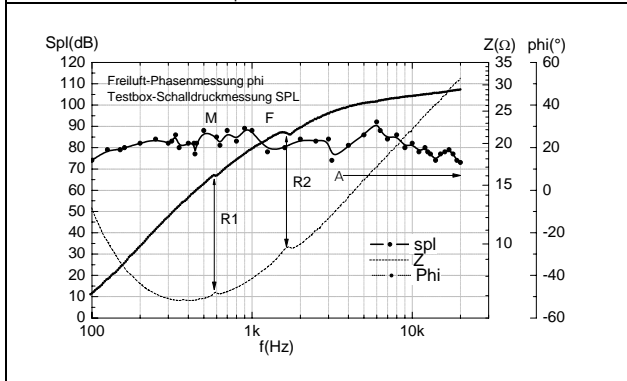


Abb. 15: Kumulatives Zerfallsspektrum Görlich 130/25-8VK [1]

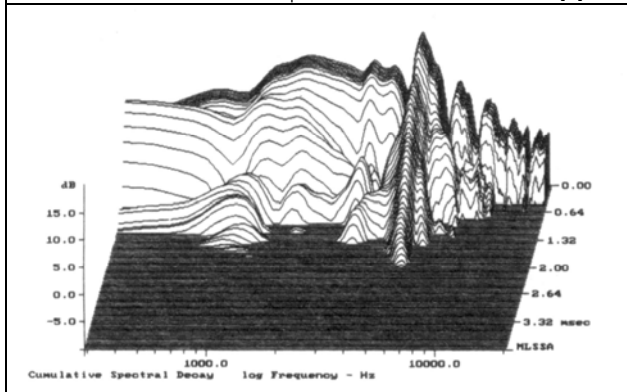
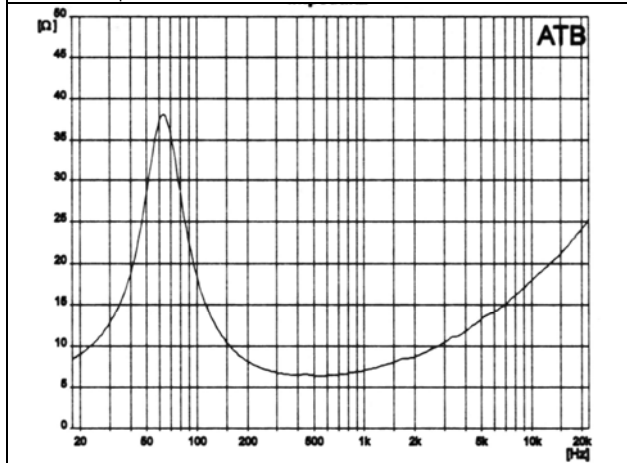


Abb.16: Impedanz Görlich 130/25-8VK [25]



Die Welligkeit M (Abb.14) beschreibt Brüel&Kjaer als Messfehler, wenn ihr Präzisionsschallpegelmeßgerät 2235 mit Mikro 4134 durch

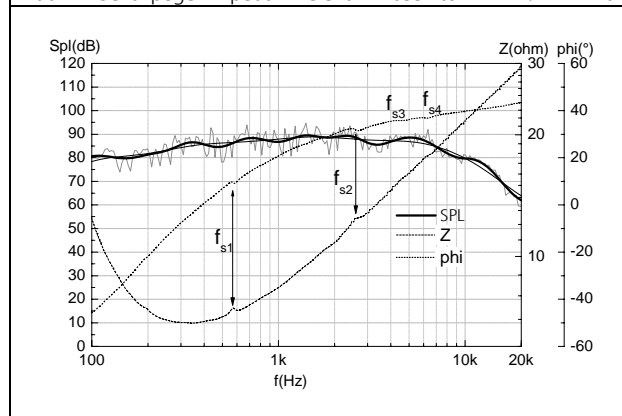
eine dahinterstehende Person beobachtet wird. Die Messung Abb.14 ist noch nicht durch die Mikrofoneichkurve korrigiert worden, so dass der reale Schalldruckpegel um 15kHz um einige dB tiefer liegt, die notwendige Korrektur ist aber bei 6kHz -0dB, d.h. die Kurve sinkt nach der Spitze schneller ab und wird der in Abb.15 noch ähnlicher. Die Görlich-Podzus Hartschaummembran, die mit Aluminiumfolie beklebt worden ist, zeigt also beträchtliche Membranaufbrechungen, die sich nicht in der elektrischen Phase niederschlagen. Die ausgeprägten Stufen in der Impedanzkurve in Abb.16 sind dagegen echte Nebenresonanzen. Diese liefern meist lokale Verstärkungen von Verzerrungen.

Membranen sind steif mit der Schwingspule verbunden, die Membranresonanzwellen können sich so auch bis zur Schwingspule fortpflanzen und ihre Wirkung in der Impedanz hinterlassen. Dies wird aber erst bei hochauflösenden Impedanz- und Phasenmessungen (300 Meßpunkte/Dekade) erkennbar, wie in Abb.14 des Eton 5-880/25 HEXb mit f_{s2} .

Dieses Exemplar wird in seiner Kataloganpreisung „absolut präzise und detailgenaue Abbildung“ fast gerecht. Die Töne bis eine Oktave oberhalb der Hauptresonanzfrequenz von 58Hz sind von ungewöhnlicher Reinheit und „Wärme“, erst mit 2kHz beginnend, scheinen diese „rauer“ zu wirken, bei der Resonanzfrequenz von 2,5kHz wirken sie schon „nervig“, ab 7kHz sind die Töne wieder erstaunlich sauber. Die Hörergebnisse korrelieren gut mit den Messungen der Impedanz und der elektrischen Phase. Die Resonanz f_{s2} bei 550Hz ist mit Sinus-Dauertönen nicht zu hören. Werden die Frequenzen gleitend verändert, vermerkt man, dass an dieser Stelle einen etwas aufdringlicheren Ton, der nicht so sauber klingt. Dieser Effekt beruht auf der Helmholtz-Resonanz hinter der Staubschutzkalotte und der dahinter befindlichen Belüftung. Wird diese mit offenporigem Schaumstoff verschlossen, wird die Phasenwende flacher, der Ton etwas weniger eindringlich, aber die Belüftung wird eben auch abgeschwächt.

Ab 1kHz kann man Verzerrungen vernehmen, die bei f_{s3} kulminieren und dann wieder abnehmen. Diese Nebenresonanz f_{s3} hängt wahrscheinlich mit der Membran und nicht mit der Staubschutzkalotte zusammen. Die Fertigungstoleranzen sind offensichtlich relativ groß, denn in den verschiedenen Tests von Zeitschriften liegt nicht nur f_{s3} erst bei 3kHz, auch die kumulativen Zerfallsspektren zeigen die Ausschwingverzögerungen unterschiedlich. Zuweilen liegt diese bei 6kHz und andermal bei 3kHz. In der Internetdatenbank der Firma ETON GmbH [2] selbst findet man sogar eine 2. Ausschwingverzögerung, eben an den selben Frequenzen, wo in Abb.17 die Resonanzen f_{s3} und f_{s4} gerade noch ermittelbar sind. In [5] ist eine einzige markante Impedanzstufe wie f_{s3} bei 3kHz zu sehen, die mit einer extremen Ausschwingverzögerung von 0,7ms auf 2,1ms korreliert.

Abb.17: Schallpegel-Impedanz-elekt. Phase Eton 5-880/25 HEXb



In Abb.17 ist bei f_{s4} 6kHz auch eine ganz leichte Impedanzstufe zu sehen, die in der Phase einen deutlichen Wendepunkt mitbringt. Diese Stufe ist auch in [1] zusätzlich zur 3kHz Stufe bei 6kHz zu finden, nur deutlicher, dort jedoch ist sie die Frequenz, bei der die Ausschwingverzögerung auftritt. Da liegt sie natürlich günstiger, da sie leichter auszufiltern ist. Das vorliegende Testexemplar ist neueren Datums, während die Messungen in [3,4] allesamt aus dem Jahre 1996 sind, dort zeigen sich die Ausschwingverzögerungen nicht nur geringer sondern auch erst bei 6kHz. Im zur Verfügung stehenden

Testexemplar war auch eine hohe Porendichte ($>20/cm^2$) in der Beschichtung zu erkennen, das würde bedeuten, dass die Oberflächenresonanz zu schwach bedämpft wird. Insgesamt aber kann man sagen, dass die eigene Impedanz-Phasenmessung am besten den ETON hauseigenen Originaldaten entspricht.

Vifa brachte eine völlig neue Hochtönergattung heraus, eine mit Gewebe-Ringmembran anstelle einer Gewebekalotte, der XT25TG30-04. Der Frequenzgang sollte bis 40kHz reichen. Das wäre ein geeigneter Kandidat, falls die neuen Hochbittechnologien marktreif wurden. Ein Paar solcher Exemplare standen zum Test zur Verfügung. Es waren Musterexemplare für einen Lautsprecherentwickler, der aus Zeitmangel noch nicht zur Prüfung gekommen war. Die HT ließen sich auch ohne Probleme in das Gehäuse integrieren. Die Schalldruckmessung wurde bei hohen Frequenzen begonnen, damit bei zu großen Verzerrungen im niederfrequenten Bereich bei dem 1W Leistung rechtzeitig abgebrochen werden konnte.

Beim 1.Exemplar wurde dann auch in der Hauptresonanz abgebrochen, da ungewohnte Signalstörungen auftraten, der HT hätte ja defekt sein können. Die Impedanzmessung im Vergleich zeigte jedoch kein Unterschied zum unbenutzten 2.Exemplar, bis auf einen kleinen Peak, der aber bei der Nummer 2 war. Die Messung des zweiten wurde dann trotz der unangenehmen Geräusche zu Ende geführt. Die Nummer 2 hatte einen homogenen Frequenzgang, die Störgeräusche waren nicht ganz so erheblich aber immer noch viel größer als der originale HT der Br25. In [6] wurde dazu später eine Klirrmessung des baugleichen XT300 V/4 veröffentlicht. Extrem hohe Verzerrungen lieferte das Exemplar von [10] mit 1% k_2 in 3kHz, ebenfalls bei 90dB. So blieb keine Spekulation über die Hörbarkeit von Verzerrungen.

Allein vom Frequenzgang her, war es ein vielversprechender HT. Am oberen Ende $> 8kHz$ stiegen die Exemplare im Schalldruck noch an. Der Abstand zu den nächsten Gehäusekanten betrug 7, 9 und 12cm. Die Anhebung kam erst, als die Amplitudenkorrektur für den Vorverstärker des Pegelmessers berücksichtigt worden war.

Abb.18: Vifa XT25TG30-04 Schalldruck, Impedanz u. el. Phase

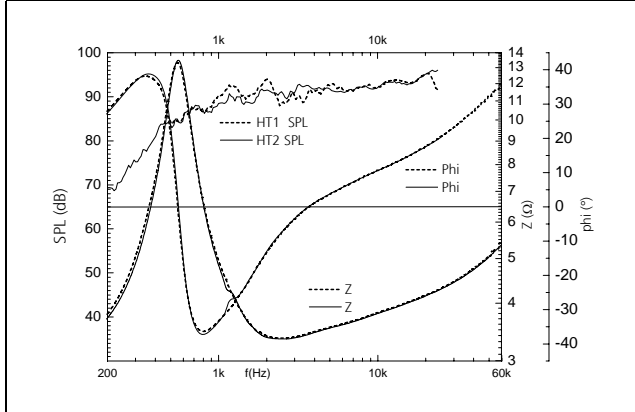
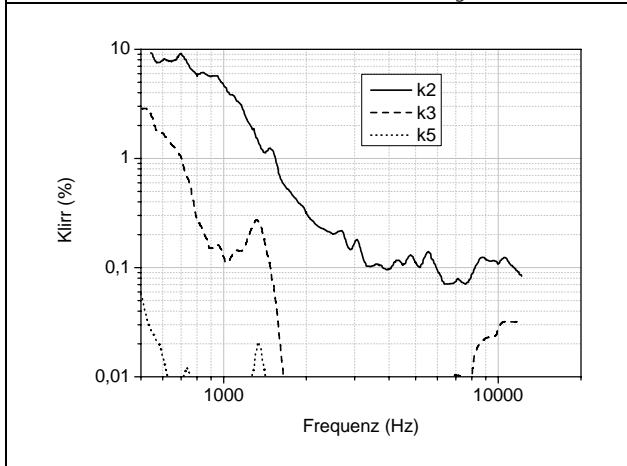


Abb.19: Vifa XT300 V/4 harmonische Verzerrungen bei 90dB [6]



Obwohl der Ringtöner fast keine Nebenresonanzen hatte, mussten die Verzerrungen als zu hoch eingeschätzt werden, zumal die Fertigungstreu noch nicht auf dem notwendigen Stand war.

Außer dem Vifa XT25 wurden noch die 25mm Scan-Speak D2904/9700, D2904/9800 und der 19mm Hiquiphon OWI vermessen und klanglich beurteilt.

Rein vom Hören her war der 9800 derjenige mit den geringsten Verzerrungen, bis zu den Grundtönen hinunter. Selbst geringfügig größere Leistungen ließen ihn nicht entarten, obwohl er den niedrigsten X_{Lin} hatte. Sein Preis war auch der höchste. Leider wurden keine Verzerrungsdiagramme veröffentlicht außer in der Klang+Ton [7], wo k_2 der 9700 als höchste Komponente bis 1kHz unter 0,2% blieb, der 9800 hingegen stieg von 5kHz bis 1kHz auf 0,4% an. Sonst war alles identisch, Impuls und Ausschwingdiagramme. Beim Betrachten der Impedanz- und Phasendiagramme

Abb.20: D2904/9700, el. Impedanz und Phase

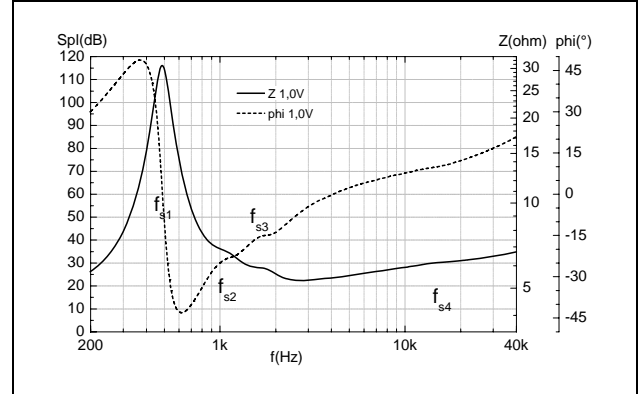
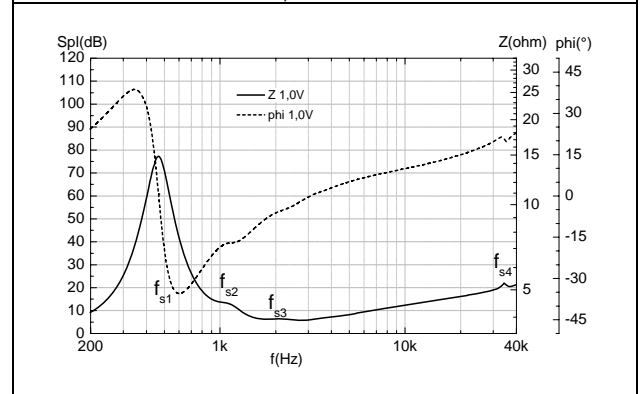


Abb.21: D2904/9800, el. Impedanz und Phase



Bei der Vermessung des 9800 wurde überraschend festgestellt, welche hohen Frequenzen über 20kHz hinaus doch hörbar sind. Folgende Begebenheit wurde bei der Vermessung erlebt: Vor dem Mittag wurde, um die Zeit zu nutzen, der 9800 an die HP4284 geklemmt und eine Impedanzgangmessung angeschoben. Nach der Rückkehr in das fensterlose Optiklabor mit einem Mitarbeiter wurde etwas ungewöhnliches bemerkt. „Hörst du das, da ist doch irgendwas?“ Darauf der andere „Ja, irgendwas komisches. Hoffentlich ist nichts kaputtgegangen.“ Nach einem allgemeinem Hoffentlich wurde jedem, der sich im Raum befand, das seltsame Geräusch immer unerträglicher. Nun wurde immer intensiver gesucht, aber alles schien in Ordnung zu sein. „Du, die Messung ist fertig, ich klemm das mal ab.“ „Hast du gemerkt, das ist jetzt weg!“ „Ja, stimmt.“ „Klemm's noch mal an!“ „Es ist wieder da.“ „Mach's wieder raus.“ „Ah, endlich Stille.“ Die Messung lief bei 1V von 20Hz bis 40kHz und war bei der letzten Messfrequenz stehengeblieben. Das Gehörte war das 40kHz Sinussignal. Alle waren verblüfft und um eine tiefgehende Erfahrung reicher.

Die beste messtechnische Übereinstimmung des Schalldruckpegels mit dem Datenblatt konnte mit dem Hiquiphon erlangt werden. Laut Datenblatt lieferte dieser die niedrigsten Verzerrungen ab der empfohlenen Trennfrequenz 2,5kHz mit THD (1W) $<0,15\%$. Leider

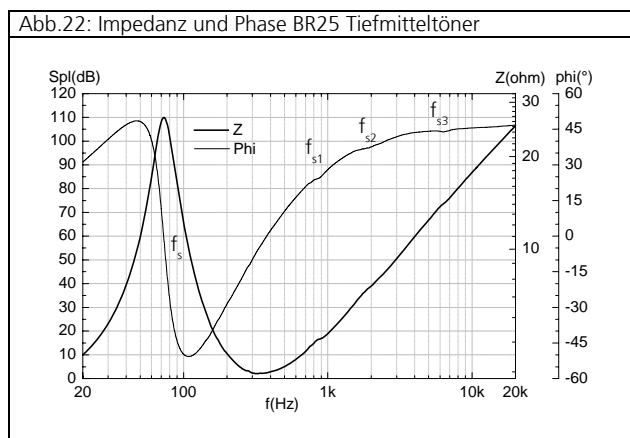
bestätigte das Gehör dies nicht und die publizierten Verzerrungsdiagramme mit THD > 0,3% später auch nicht [9].

Tabelle 8: Reinheit der Sinustöne

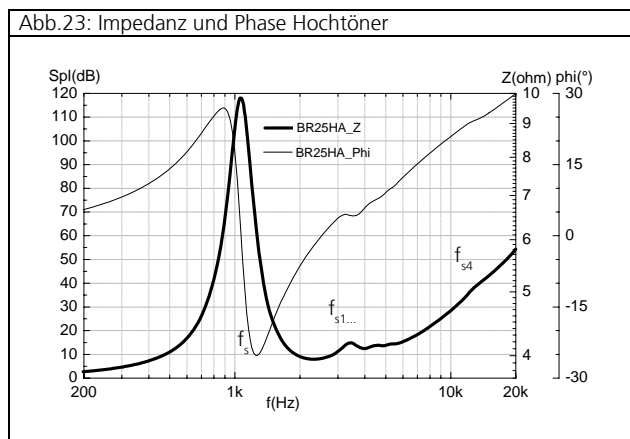
	$X_{i,in}$	f_s	$f_{trenn, H}$	n_{fres}	R_{DC}	Klang
Vifa XT25	0,5mm*	560Hz	1,5kHz	1	3,0ohm	4/5
Scan-Sp. 97	0,4mm	485Hz	2,0kHz	2	4,7ohm	3
Scan-Sp. 98	0,1mm	465Hz	2,0kHz	3	3,5ohm	1
Hiquph.OWI	0,9mm	880Hz	2,5kHz	3	5,8ohm	2

5.2.3. BR25 nach Sickenreparatur

Dank eines Tests von Studioloautsprechern in einer HiFi-Zeitschrift wurde ersichtlich, dass Musikelektronik Geithain als GmbH die Wende überlebt hatte und weiter Lautsprecher entwickelt und sogar baut. Nach 3 Monaten wurden neue Sicken in 1a Qualität eingesetzt. Die neuen waren dicker und aus einem anderen Material. Nicht mehr der dünne Schaumstoff sondern ein schaumartiges Gummikompositmaterial wurde verwendet, das gleiche wie für ihren bewährten Mitteltöner ihres aktiven Studiomonitors, elastisch aber hochdämpfend. Haben sich die Thiele-Small-Parameter verändert? In Abb.22 sind Impedanzverhalten und elektrische Phase eines „neuen“ Tieftöners für die BR25 dargestellt. Neben der Hauptresonanz f_s bei 73Hz existieren noch 3 klare Nebenresonanzen. f_{s1} ergibt sich durch den Helmholtzresonator hinter der Staubschutzkalotte und ist trotz guter Bedämpfung noch gut herauszuhören. Die Trennfrequenz war in der Originalbox bekanntlich auf 1800Hz gelegt, so dass sie gleichzeitig f_{s2} schwächt. f_{s3} bei 6kHz, eine deutliche Membranresonanz, muss ausreichend unterdrückt werden.



Den Impedanz- und Phasengang des Kalottenhohtöners nach einer Feinjustage der Schwingspule (Klirrminimum) kann man aus Abb.23 herauslesen.



Die Hauptresonanz liegt bei 1060Hz, für die damalige Zeit (1984) ein sehr guter Wert. Daneben gibt es eine Serie Nebenresonanzen $f_{s1}...$,

deren Lage und Intensität von Exemplar zu Exemplar ein wenig streuen. f_{s1} bei 3,4kHz ist wahrscheinlich auf die Hohlraumresonanz hinter der Polplatte zurückzuführen, f_{s4} dagegen auf den leicht durch ein Schaumstoffkugelabschnitt bedämpften Hohlraum hinter der Kalotte. Die f_{s1} und folgende führen zu einer Überbetonung des Präsenzbereiches und f_{s4} , die in dem anderen Exemplar weniger deutlich in Erscheinung trat, zu einer Verfärbung, die einen metallischen Beiklang bewirkte.

Für die Nutzung von Chassis aus der gewöhnlichen Produktion und Vertrieb ist über die Jahre trotz gleicher Bezeichnungen oder zumindest sehr ähnlicher Bezeichnungen mit relativ großen Fertigungsschwankungen oder Änderungen zu rechnen und man muss sich darauf einstellen, dass sich negative Parameter um $\frac{1}{2}$ Oktave zu noch ungünstigeren Bereichen verschieben können. Eine Messung ist notwendig, wenn man übertriebene Sicherheitsmaßnahmen bei der Filtergestaltung vermeiden will. Fremdmessungen sind geeignet, um im groben Rahmen Gefahren ungünstiger Eigenschaften abzuschätzen, wobei die Fremdmessungen doch nicht zu alt sein dürfen.

Die individuell bedingte Gehäusewelligkeit im Präsenzbereich des Schallpegels von Kalottenhohtönern ist dann zu berücksichtigen, wenn eine Kantenabrundung nicht erfolgt oder deutlich unter einem Radius von 3cm erfolgt, insbesondere dann, wenn wie üblich der Hohtöner oben in der Umgebung von 3 Kanten angebracht wird.

Es schien einen Zusammenhang zwischen Nebenresonanzen mit lokalen Pegelanhebungen und Ausschwingverzögerungen zu geben. Oberhalb von 1kHz bis 6...8kHz wurden in den eigenen Messungen wie auch in den Fremdmessungen, nicht nur die hier (5.2.2) vorgestellten Nebenresonanzen mit lokalen Pegelanhebungen abgebildet. Im Vergleich mit aktuellen kumulativen Zerfallsmessungen korrelierte die Phasenwende mit der Ausschwingverzögerung. Je stärker die Phasenwende ausgeprägt war, die mit einem schwächeren lokalen Impedanzpeak verbunden gewesen ist, desto stärker war die Ausschwingverzögerung. War die Phasenwende nur als Stufe erkennbar und gerade noch nicht als Welle ausgebildet, dann ist die Verzögerung < 1,5ms noch gering und soll kaum hörbar gewesen sein. Wenn der Winkel im Wendepunkt der Phasenwende weniger als 360° (math-pos. Drehsinn) betrug und gut als Welle erkennbar war, dann verzögerte sich das Ausschwingen deutlich und zwar um so stärker je mehr der Winkel von 360° nach unten abwich (jedoch immer $>270^\circ$).

Die Eigenschaften von Chassis können in der Reihenfolge um so mehr verbessert werden, wenn folgende Maßnahmen angewendet werden: 1. Mehrfachsichten (bei einem Einstoffsystem, z.B. Laminat), 2. Mehrschichtkombinationen (Mehrstoffsystem, z.B. Papier beschichtet), 3. Verbundschichten (Mehrstoffsystem sich gegenseitig durchdringend, z.B. Kevlargeflecht getränkt), 4. Verbundkonstruktionen (Gewebe/Trägerkonstruktion mit Dämpfungsmaterial gefüllt, z.B. Kevlar/Nomex/Kevlar-Wabensandwich getränkt und beschichtet wie ETON). Je höher der mechanische Konstruktionsaufwand, desto höher sind aber auch die Kosten, vor allem, wenn gegenüber den Mitbewerbern Vorteile im Klirrvverhalten erzielt wurden (z.B. Scan-Speak).

Es stellte sich die Frage, ob man mit einfacheren z.B. Papierchassis und geringeren Kosten gleich gute Ergebnisse erzielen könnte. Wenn die oben diskutierte Korrelation Klang zur Impedanzkurve galt, sind elektrische Massnahmen zur Begradigung der Impedanzmaxima und -welligkeiten sehr vielversprechend. Leider gaben die Hersteller ihre Impedanzkurven (und nicht nur die, sondern auch die Selbstbauzeitschriften), wenn überhaupt, nur mit sehr niedriger Auflösung an, es ist unüblich die besser auflösende logarithmische Impedanzkurve zu zeigen. Es waren meist nur die Hauptresonanzen zu erkennen, die Nebenresonanzen sind manchmal nur marginal zu erkennen gewesen und wurden nicht erwähnt. Ob die Nebenresonanzen klanglich eingehen, wurde im vorhergehenden Kapitel untersucht. In den Zeitschriften KLANG+TON und HOBBYHIFI werden seit dem Jahre 2001 umfangreiche Klirrkurven mit gemessen und es war ziemlich signifikant, dass besonders zu den Hauptresonanzen hin, der Klirr sehr stark angewachsen ist und für Hohtöner mindestens 1...2% mitunter mehr als 5% betragen konnte. Noch grösser waren die Resonanzeffekte für Tieftöner. Die Hauptresonanzen von Hohtönern wurden üblicherweise nur für eine richtige Frequenzweichtrennung, falls erforderlich, nur so weit unterdrückt, wie es gerade notwendig war. In „High-End“ Arbeitsräumen wurden sie meist richtig begradigt, da man möglichst tief den Hohtöner starten lassen will. Vereinzelt gibt es aber

Bemühungen die Impedanzkurve richtig zu begründen, ob Nebenresonanzen berücksichtigt werden, kann man aus den Ausführungen nicht entnehmen, z.B. [11, 2001].

5.2.4. Ermittlung der Thiele-Small-Parameter

Jörg Panzer hat in [12] eine Ausgleichsrechnung vorgeschlagen, um die Thiele-Small-Parameter ausreichend genau und zuverlässig ermitteln zu können. Leider sind ab und zu kleine Fehler enthalten, die ein direktes nachvollziehen der Berechnungen nicht erlaubten. Es gelang diese Fehler auszumerzen. Mit Vernachlässigung der Schwingspulenimpedanzzunahme Q_s im Bereich der Hauptresonanz f_s und der genauen Kenntnis des Gleichstromwiderstandes R_e kann das Impedanzmaximum $Z_s(f_s)$ im Impedanzfrequenzgang $Z_e(f)$ als nahezu symmetrische Kurve angenommen werden:

$$Z_e = R_e \cdot [(f_s^4 + f_s^2 \cdot B + 1)/(f_s^4 + f_s^2 \cdot A + 1)]^{1/2}$$

wobei die Variablen A und B folgendes beinhalten:

$$B = 1/Q_s^2 - 2$$

$$A = 1/Q_{ms}^2 - 2$$

Der Trick besteht darin, dass sich diese Funktion mit

$$y = a \cdot x + b$$

linearisieren lässt, wenn x aus den Messwerten der Frequenz f

$$x = (f_s/f)^2 + (f/f_s)^2$$

und y aus den jeweilig zugehörigen Messwerten Z_e und aus R_e

$$y = 1/[(Z_e(f)/R_e)^2 - 1]$$

berechnet wird. Man bestimmt möglichst viele Wertepaare (Z_e ; f_i) ober- und unterhalb der Resonanzfrequenz f_s , vorzugsweise mehr unterhalb, da dort die Schwingspulenreaktanz weniger eingeht und trägt diese in eine Tabelle ein und berechnet die zugehörigen x und y. Wie aus der linearen Regressionsrechnung bekannt ist, müssen noch die jeweiligen y^2 und das Produkt aus x und y berechnet werden. Die Frequenz f wird in Hz und die Impedanz in ohm eingetragen. Im einfachsten Fall kann die Frequenz des Tongenerators verwendet werden. Das Lautsprecherchassis wird mit einem Vorwiderstand R_v (Leistungswiderstand) von 100 bis 500ohm betrieben und die Spannung über den Chassisklemmen bestimmt. Nach Austausch des Chassis gegen einen normalen Leistungswiderstand im Bereich des Gleichstromwiderstandes des Chassis kann man die gemessene Spannung eichen und alle Impedanzen Z_e aus den gemessenen Spannungen berechnen.

Tabelle 9:

f (Hz)	Z_e (ohm)	x	y	y^2	xy
f_1	Z_{e1}	x_1	y_1	y_1^2	$x_1 y_1$
f_2	Z_{e2}	x_2	y_2	y_2^2	$x_2 y_2$
...
f_i	Z_{ei}	x_i	y_i	y_i^2	$x_i y_i$
...
f_n	Z_{en}	x_n	y_n	y_n^2	$x_n y_n$

Danach bestimmt man die Summen

$$a = x_1 + x_2 \dots x_i \dots x_n$$

$$b = y_1 + y_2 \dots y_i \dots y_n$$

$$c = y_1^2 + y_2^2 \dots y_i^2 \dots y_n^2$$

$$d = x_1 y_1 + x_2 y_2 \dots x_i y_i \dots x_n y_n$$

über die Hilfsvariablen R, P und N

$$R = n \cdot d - a \cdot b$$

$$P = b \cdot (c - 2 \cdot a) + d \cdot (2 \cdot n - a)$$

$$N = n \cdot c - a^2$$

werden die Gesamtgüte Q_{ts} , die mechanische Güte Q_{ms} und schließlich die elektrische Güte Q_{es} ermittelt.

$$Q_{ts} = [R/(N + R)]^{1/2}$$

$$Q_{ms} = (R/P)^{1/2}$$

$$Q_{es} = Q_{ts} \cdot Q_{ms}/(Q_{ms} - Q_{ts})$$

Durch einen Vorwiderstand R_v , wie eine Tiefpassspule ihn hat, ändert sich die elektrische Güte zu Q_{es}^* und demzufolge auch die Gesamtgüte zu Q_{ts}^*

$$Q_{es}^* = Q_{es}/R_e \cdot (R_e + R_v)$$

$$Q_{ts}^* = Q_{es}^* \cdot Q_{ms}/(Q_{ms} - Q_{es}^*)$$

Bleibe noch das Äquivalentvolumen zu bestimmen. Nach Panzer gilt die Gleichung $V_{as}(r_M; f_s'; f_s)$, wobei r_M der Membranradius einschließlich halber Sickenbreite in Zentimeter (cm) eingesetzt werden muss. f_s' ergibt sich als neue Hauptresonanz nach Anbringen einer Zusatzmasse m_{zus} von einigen Gramm. Bei 10er Tiefmitteltönern genügen 1,5g, bei 13ern 2g usw. .

Weiter typische Lautsprecher-Parameter sind C_{ms} , R_{ms} , M_{ms} und L_e . C_{ms} ist die Summe der Nachgiebigkeit sowohl der Membranaufhängung als auch die der oft vergessenen Zentrierspinne. R_{ms} sind die mechanischen Reibungsverluste, die in Wärme umgesetzt werden, M_{ms} ist effektive Membranmasse ohne mitschwingende Luftmasse und L_e ist die Schwingspuleninduktivität.

$$V_{as} = 355 r_M^4 (1/f_s'^2 - 1/f_s^2) / m_{zus}$$

$$M_{ms} = m_{zus} / ((f_s'/f_s)^2 - 1)$$

5.2.5. Neusimulation des Tieftöners BR25 RFT 7701

Bei den heute zur Verfügung stehenden Software Möglichkeiten kann man die erforderlichen Mengen an Messungen und Rechnungen schnell erledigen.

Mit Hilfe der Präzisionsmessbrücke LCR Meter von Hewlett-Packard HP 4284A 20Hz-1MHz (1993) lassen sich sofort numerisch die Impedanzen Z erfassen. Dieses Gerät bringt gerade im tiefen Bereich eine sehr hohe Auflösung. Die Messdatenerfassung erfolgt über GBIP IEEE in Form von ASCII-Tabellen. Die Auswertung erfolgte über Origin von Microcal.

Das reparierte BR25 Tiefmitteltöner-Chassi wurde mit der HP4284A verbunden und 24 Stunden bei 25Hz bis 3mm linearen Hub belastet. Einen Tag später dann wurde die Messung gestartet. Anschließend wurden 2g Knetmasse auf den Kalottenrand der Dustcap der Membran in Ringform gedrückt und die Messung wiederholt. Die Frequenzauflösung betrug ca. 0,5Hz, die Impedanz konnte nach dem „warm up“ mit 3 stelliger Genauigkeit registriert werden.

Nach Eintragen der per Hand gemessenen Parameter $r_M=4,9$ (cm), $R_e=3,515$ (ohm) in die Tabellenzellen und graphischen Bestimmung der Resonanzen $f_s=73,03$ (Hz) und $f_s'=f_{sz}=65,01$ (Hz) und die Auswaage der Zusatzmasse $m_{zus}=m_{zus}=2,00$ (g) konnte die Rechnung ausgeführt werden lassen. Die Ergebnisse sind in Tab.10 abzulesen. Dort wurden die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur V_{as} Bestimmung nach Dickason und LASIP6 mit eingetragen.

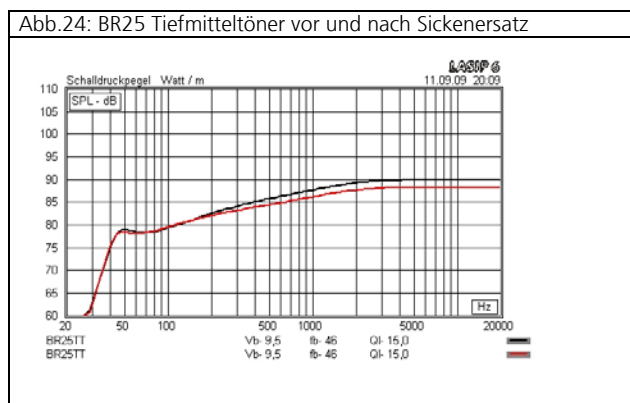
Der Vergleich alt gegen neu ergibt sinnige Größen. Die neue Sicke ist deutlich dicker und weniger elastisch und reißfester. Als Schaumstoff-Gummi-Kompositmaterial bringt sie auch eine höhere Masse mit als die alte, die aus reinem Schaumstoff war. Sie ist weniger nachgiebig, wie an C_{ms} zu sehen ist und die Reibungsverluste R_{ms} sind etwas größer. Dadurch ergibt sich eine höhere Resonanzfrequenz f_s und ein geringeres Äquivalentvolumen V_{as} . Welche Tieftönereigenschaften ergeben sich jetzt neu? Ist zu wenig Bass zu befürchten? Die Antwort gibt Abbildung 24.

Die Änderungen der Tieftonpegel sind zum Glück marginal, lediglich der Mitteltonbereich verläuft anders, prinzipiell gesehen sogar ausgeglichener, vermutlich durch die höher bedämpfenden Eigenschaften der neuen Sicke. Der Hub im Subsonicbereich (nicht dargestellt) ist um 30% geringer geworden, also anstatt 9mm bei

20Hz sind es nur noch 6mm. Genau das war ja wünschenswert gewesen. Durch die geringen Mitteltonpegel musste der Hochtöner um -1,5dB abgesenkt werden. Insgesamt scheinen die Verzerrungen geringer geworden zu sein, natürlich verglichen mit dem Zustand vor dem Einreißen der Sicken. Die Aussteuerung des Tieftöners wurde nicht mehr ganz so kritisch.

Tabelle 10: Vergleich neuen Parameter mit den alten

Parameter	Größe alt	Größe neu	Einheit	Methode
rM	4,9	4,9	cm	
Sd	75,43	75,43	cm ²	
Re	3,515	3,515	ohm	
fs	67	73,03	Hz	
fsz		65,01	Hz	
Qms	2,89	3,013		
Qes	0,331	0,460		
Qts	0,297	0,399		
mzus		2,000	g	
Mmr		0,377	g	
Mmd	7,1	7,7	g	
Mms	7,4	8,0	g	
Cms	0,77	0,593	mm/N	
Rms	1,05	1,220	kg/s	
Z(10kHz)		19,617	ohm	
Le((10kHz)	0,298	0,307	mH	
VasP	6,79	5,026	L	Panzer
VasD		4,789	L	Dickason
VasL		4,450	L	LASIP6
fB		1117	Hz	



2.6.3. Einige Grundbetrachtungen zu Lautsprecherchassis

In der professionellen Lautsprecherkonstruktion sind neben den durch die Vermarktung bedingten Gegebenheiten oft auch die subjektiven Grundeinstellungen und Klangphilosophien entscheidend für die konkrete Wahl von bestimmten Chassis.

Bei den zu realisierenden Lautsprecherkonstruktionen werden in der Praxis, um einen möglichst geraden Schalldruckverlauf zu erhalten, meist auf 1m Entfernung, in Wirklichkeit alle anderen Parameter sekundär. Wenn es dann immer noch nicht dem subjektiven Ziel unter den gegebenen Abhörbedingungen entsprechend klingt, werden Abweichungen von der Linearität in Kauf genommen. Es wird weniger gefragt, warum, es wird mehr probiert. Der Frequenzganglinearität werden u.a. untergeordnet: Impuls-wiedergabe, Phasenverlauf und die elektrische Polung der Chassis. Die entwicklungstechnische Berücksichtigung dieser Parameter ist nur mit einem höheren Aufwand und Kosten umsetzbar. Es gibt keine idealen Chassis, nur Chassis mit mehr oder weniger ausgedehnten Betriebsnennbereichen, weil die zugehörigen Funktionen realer Chassis in ihrer Gesamtheit nur in einem engen Bereich, dem Betriebsnennbereich dem Ideal etwas näher kommen. Der unerwünschte Teil muss bedämpft und ausgefiltert werden.

Den elektrodynamischen Lautsprechern kommt gegenwärtig eine viel größere praktische Bedeutung zu als den elektrostatischen Wandlern. Magnetostaten gehören eigentlich zu den elektrodynamischen Wandlern. Die ferroelektrischen und plasmalelektrischen Wandler sind nur sehr selten anzutreffen.

Abgesehen vom größeren Aufwand für großflächige Elektrostaten und davon, dass für die Tieftonwiedergabe meist auch nur ein Konus in Frage kommt, ist die Aufstellung eines solchen Lautsprechers dennoch recht schwierig in einem normalen Wohnraum von 25m². Die Wohlgefälligkeit der Elektrostaten wie auch der dynamischen Bändchen täuschen manchen Zuhörer nicht nur beim ersten Höreindruck mit im Original nicht vorfindbaren Signalen aber einer ausreichend klaren Brillanz, die manche Zuhörer in den „sphärischen Höhenrausch“ versetzte. Elektrostaten und Magnetostaten können auch als Dipol eingesetzt werden. Elektrostaten arbeiten mit wechsellspannungsangetriebener Anziehung und Abstoßung. Dazu muss die Spannung durch Transformatoren mit Kernen hochgesetzt werden, was sich nicht günstig auf Klirrraum auswirkt.

In Klang+Ton sowie HobbyHifi wurden Messungen mit den unterschiedlichsten Chassisarten vorgenommen. Ebenso enthielt die Datenbank von Hifisound viele Parametersätze und Kurven. Leider wechselten die Messbedingungen zwischendurch, so dass, erst wenn alle Hefte vorliegen, die Bedingungen und Begleiteffekte nachvollziehbar und begreifbar ist. Auch dort werden Druckfehler gemacht, so dass es wichtig ist, nachfolgende Hefte zu haben, ansonsten kommt es zu Fehlinterpretationen. Neben den Schalldruckmessungen und Impedanzkurven, die meist auch jeder Hersteller bekannt gibt, werden in den Heften auch noch das Ein- und Ausschwingverhalten durch die Sprungantwort dokumentiert, wie auch das Ausschwingverhalten durch Wasserfallspektrum. Seit einigen Jahren werden auch Klirrmessungen dargestellt. Darüberhinaus wurden bei Klang+Ton auch elektrische wie akustische Phasenmessungen dargestellt. Die unterschiedlichen Messbedingungen haben Einfluss auf das Ausschwingverhalten und den Schalldruck-Amplitudengang. Wichtig sind auch unabhängige Messungen und Ermittlungen von den Thiele-Small-Parametern, nicht nur für Tieftöner. Während sich HobbyHifi mit 30° Messungen beschränkt, lieferte Klang+ton auch 15° und 45° Messungen zur Beurteilung des Rundstrahlverhaltens. Mehr ist wahrscheinlich nicht sinnvoll, da die Konstruktion der Schallwände und ihre Dimensionierung unterschiedlich waren und sich änderten. Ganzheitliche Polardiagramme zum Rundstrahlverhalten werden manchmal auch von Herstellern veröffentlicht, z.B. von VISATON.

Im Bezug auf den Anschaffungspreis ist es gelungen den Klirr der Kalotten/Konus-Kombination am niedrigsten gegenüber allen anderen Schallwandlerlösungen zu halten. Außer den harmonischen Verzerrungen kommen noch nichtharmonische bzw. nichtlineare sowie Intermodulationen hinzu, die aber fast nicht bekannt werden (außer Kapitel 2.) und möglicherweise Gründe für die letzte subjektive Entscheidung liefern.

Alle Chassis mit elektrodynamischen Wirkprinzip arbeiten mit der gleichen Antriebsmethodik, es fließt ein Strom durch einen metallischen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet. Das Magnetfeld wird durch einen starken Permanentmagneten erzeugt und durch Platten auf einen schmalen planen Ringspalt konzentriert, darin befindet sich der metallische Leiter, der an einer steifen Fläche, der Membran befestigt ist. Fließt ein elektrischer Strom durch den Leiter, wird um ihn herum ebenfalls ein Magnetfeld aufgebaut, infolge dessen wird der Leiter entweder in die eine Richtung oder in die andere gezogen, je nach Richtung des Stromvektors, dabei wird die Luft durch die Membran „angeschlagen“.

Der Magnetfeldvektor von der Polplatte zum Polkern steht bei normalen Konus- und Kalottenchassis also radial zur Schwingspule. Dazu senkrecht steht jedoch der Magnetfeldvektor der ganzen Schwingspule. Die Verzerrungen sind unsymmetrischer Natur, da das Feld oberhalb der Polplatte ein anderes ist als unterhalb. Eine preiswerte Methode die Unsymmetrie abzuschwächen, ist die Einbringung einer Kurzschlusswicklung aus Kupfer in und unterhalb der oberen Polplatte am Polkern. Kupfer ist der zweitbeste elektrische Leiter und nicht ferromagnetisch sondern nur paramagnetisch. Demzufolge würde eine leitfähige Membran wie bei Metall-Membranchassis (z.B. Al-Membran) die Unsymmetrie verstärken, sie stellt eine Kurzschlusswindung außerhalb dar, abgesehen davon, dass sie im Restfeld des Magneten eine Gegenkraft zum Membranschub hervorruft, dass zu einer besseren Bedämpfung führt oder vielleicht auch zu zusätzlichen Verzerrungen. Die Form der Membranen reicht von einem regelmäßigen Konus über die Navimembran, Invers(Konkav)kalotte, Flachmembran bis zur Konkavkalotte. Die Membranen haben eine um so höhere Gesamtsteife, je weniger flach diese sind. Noch besser ließe sich das

Magnetfeld auf die Spule konzentrieren, wenn die Platten mit Wismut beschichtet wären.

2.6.3.1. Elektrodynamische Hochtöner

Die konvexe Kalottenform, bei der die Membran kleiner als der Spulendurchmesser ist, wirkt der Schallbündelung bei hohen Frequenzen besser entgegen, hat aber einen geringeren Wirkungsgrad. Bei G.Schwamkrug [13,14] wird das Rundstrahlverhalten von konvexer und konkaver Kalotte mit verschiedenen Verhältnissen h/r (Höhe oder Tiefe zum Radius) und kr verglichen. Leider widerspricht der Text sich diametral mit den Bildunterschriften der Graphiken. Angenommen, konkave Kalotten sind kleine Konus-Chassis und die häufig zu beobachtenden Streukörper vor diesen Membranen sollen die Rundstrahlung verbessern, dann stimmt der Text und die Graphikbeschriftungen sind vertauscht. Eine typische Hochtönkalotte von 25 bis 30mm beginnt oberhalb von 4kHz zu bündeln. Bei der doppelten Bündelungsfrequenz $kr = 2$ wird im Winkel 90° nur die halbe Schallleistung abgestrahlt. Die konvexe Kalotte hat hier ein breitere Abstrahlung, während der Pegel auf Achse je nach Verhältnis h/r um 3 bis 8dB geringer ist als bei $kr = 1$ oder 3. Der Gewinn der seitlichen Abstrahlung wird zum Verlust auf Achse. Die konkave Kalotte hingegen zeigt, analog zum normalen Konus, eine kontinuierliche Verringerung der seitlichen Abstrahlung, wobei aber auf Achse der Pegel konstant bleibt. Um die seitliche Abstrahlung zu verbessern, werden Streukörper vor die Membran gesetzt, wie bei der Focal Inverskalotten-Serie TC120 und TC 90 vorgestellt in HobbyHifi. Ihre 30° Abstrahlung ist perfekt, nur der auf Achse ist etwas erhöht. Bei 20kHz ist allerdings Schluss, dann bricht der Amplitudengang steil ein. Der Vorteil der Inverskalotten ist, dass die Schwingspule nicht am Rand befestigt wird, sondern wie bei den Konus-Chassis üblich an der Membran. Damit wird das Membranresonanz- und das Verzerrungsverhalten verbessert. Die Nachteile der Streukörper sind Reflektionen, die den Klang etwas Unschärfe geben. Auch konvexe Kalotten haben mitunter Streukörper auch Diffusor genannt vor der Membran, die den akustischen Phasengang mit geringerer negativer Steilheit gestalten aber den Klirr erhöhen.

Nicht nur bei konkaven auch bei tiefer in die Frontplatte gesetzten konvexen Kalotten werden mitunter Schutzabdeckungen in Form von Lochgittern oder Drahtnetzen vor der Kalotte befestigt, die häufig zu einzelnen Klirrspitzen von 0,5 bis 1% führen, im Vergleich zu denen ohne. Das Abstrahlungsverhalten wird außerdem noch durch Einbautiefe der Kalottenmembran in die Frontplatte beeinflusst. Durch Tiefersetzen, was einer Hornform ähnelt, verschlechtert sich das Rundstrahlverhalten. Das beste Rundstrahlverhalten von konvexen Kalotten wird dadurch erreicht, wenn der Rand der Kalotte in der Frontplattenebene sitzt. Dann aber nimmt die akustische Phase eine höhere negative wenn auch konstante Steilheit an. Die Gruppenlaufzeit wäre dann aber auch wieder konstant positiv. Bessere Kompromisslösungen von der Strahlungsführung stellen die Schallwandformen bei den Studiomonitoren von Klein+Hummel dar. Beide Arten von Kalottenformen haben Hauptresonanzen, wo der Klirr sprunghaft ansteigt. Deshalb ist es sinnvoll die Trennfrequenz zum Mitteltöner kurz davor anzusetzen. Der Klirr steigt vom Betriebsnennbereich bis zum Impedanzmaximum um mindestens Faktor 10 an. Den größten Anteil am Verkauf haben heutzutage die Gewebekalotten. Zu den älteren Kalottenmaterialien gehört das Supronyl und das Metall (Al, Ti), wobei letzteres nach einer allgemeinen Abstinenz wieder häufiger eingebaut wird, da man gelernt hat u.a. durch optimierte Beschichtungen der Membranen und durch geeigneterer Sicken die Resonanzen im hörbaren Bereich (<21kHz) ausreichend zu bedämpfen. Zu den neueren Membranmaterialien gehört Keramik. Die sind zwar sehr breitbandig, die Verzerrungen sind vielleicht infolge des immer integrierten Metallgitterschutzes manchmal relativ hoch, aber nur manchmal. Diamant und Beryllium stehen noch nicht für den Selbstbauer zur Verfügung.

Bei Kalottenhochtönern werden häufig die Schwingspulenspalte mit Ferrofluid befüllt, um die elektrische Belastbarkeit durch die bessere Wärmeabführung zu erhöhen. Die Viskosität des Fluids kann sich je nach Typ unterscheiden. Ein zweiter Grund für die Befüllung ist die Bedämpfung der Hauptresonanzspitze, die wird jedoch nicht günstig oft zu höheren Frequenzen verlagert. Ferrofluid enthält einige Nanometer große ferromagnetische Teilchen, die über Tensidverbindungen in einem Lösungsmittel suspendiert sind. Als Lösemittel werden Öle bis hochsiedende Flourkohlenwasserstoffe eingesetzt. Solche Substanzen verringern auch die Reibung von eventuell unrunder Schwingspulen an den Polplatten. Das mag ein

Grund sein, dass ferrofluidfreie Hochtöner oft höherpreisiger sind. Es sollen allerdings Fälle aufgetreten sein, wo der Luftspalt nur zum Teil mit „teuren“ Ferrofluid gefüllt war. Die Füllung mit Ferrofluid hat aber auch Nachteile. Die schwingtechnischen Parameter können sich mit der Temperatur ändern, aber auch mit der Zeit. Denn einige Lösemittel können mit der Zeit sich chemisch verändern, weil sie mit dem Luftsauerstoff vor allem bei höheren Temperaturen durch hohe Ströme und niedrige Trennfrequenzen reagieren.

Magnetostaten haben eine sehr leichte Membran, entweder eine Metallfolie oder eine Kunststoffolie mit Leiterbahnen. Die Metallfolien brauchen einen Übertrager, der die Impedanz auf normale Bereiche umformt. Damit einher gehen zusätzliche Verzerrungen, im Zeitverlauf wie in der Impulscharakteristik. Auf Grund der sehr leichten Membran ist das Einschwingen der Sprungantwort sehr gut, da die Membran aber nicht steif ist, wird das Ausschwingen nicht besser als von Kalotten und die Klirrverzerrungen steigen unterhalb einer bestimmten Trennfrequenz exponentiell an. Das Ausschwingen wird um so schlechter je größer die Fläche der Membran wird und in der Sprungantwort zeigen sich Wellen. Auch sonst ist der Klirr fast nie tiefer als bei guten Kalotten. Bei Air Motion Transformatoren wurde die Membran gefaltet, so dass die Steifheit etwas höher ist. Damit sinkt auch der Klirr und die ermöglichte Trennfrequenz. Die Preise liegen immer deutlich höher als bei vergleichbaren Kalotten. Der Vorteil der Folienhochtöner ist die Verringerung des vertikalen Abstrahlwinkels, der zu weniger Boden- und Deckenreflektionen führen sollte, aber nie irgendwo dargestellt wird. Dieser Vorteil kann aber auch als Nachteil gesehen werden, wenn dieser vertikale Bündelung genannt wird. Ein anderer Vorteil besteht darin, dass kaum Resonanzen in Form von schmalbandigen Impedanzüberhöhungen auftreten, so wie sie bei Kalotten und Konusmembranen auftreten. Die Gestaltung der passiven Filter wird einfacher.

Da im Sinne eines homogenen Magnetfeldes die Membran auch tiefer gelegt werden muss, führt dies aber zu einer Einschränkung des horizontalen Abstrahlwinkels.

Der Klirr der Magnetostaten wird zwar mit höherer Frequenz geringer, aber die obersten Frequenzen, die mit ordentlichen Pegel abgestrahlt werden können, reichen auch nicht höher als die der besten 19mm oder 25mm Kalotten, so dass es scheinbar erstmal keinen Grund gibt, diese den Kalotten vorzuziehen, die sogar eine niedrigere Trennfrequenz erlauben. Es sei denn, man will dumpfe Aufnahmen auffrischen oder man mag diese charakteristischen Verzerrungen.

Unverfälschte und regelrecht schon fast brutale Dynamik bieten dagegen die echten Hochtönhörner, wegen des prinzipbedingten höheren Wirkungsgrades (noch höher als der des Konus), die allerdings in Wohnzimmern kaum geduldet werden. Hörner haben auch nicht die gute Rundstrahlwirkung wie Kalotten. Die höchsten Frequenzen werden häufig weich ausgeblendet und das Ausschwingen in der Sprungantwort ist wellig. Die Klirrverzerrungen sind im präsentbereich meist zu hoch.

Um höhere Frequenzen bis 40kHz zu erreichen und den neuen Medien DVD, DVD-Audio und SACD genügend Rechtfertigung zu geben, entwickelte Vifa, wie bereits beschrieben, den Biegewandler mit seiner sehr guten Impulsantwort zu einem Ringstrahler weiter und stattete diesen mit einem Phase Plug aus. Oder anders gedacht, wenn schon die Gewebekalotte bei höheren Frequenzen in der Mitte schon nicht mehr mitspielt, dann kann die Kalottendomspezial gleich befestigt und der Sickenbereich größer gemacht werden.

Dieser Wandler hat eine ringförmige Membran mit mittig angebrachter Schwingspule, wobei beiderseits die Membran wie eine konvexe Sicke gestaltet ist. Als abstrahlendes Material wird aber immer noch das bewährte Gewebe der Kalotten eingesetzt. Als Hauptverzerrungen oberhalb 2kHz, wird k_2 mit mindestens 0,3% bei 90dB erzeugt. Das Ausschwingen ist leicht verzögert wie bei einer Güte unter $1/2$, hat aber damit kein Überspringen wie normale Kalotten. Später stellte Scan-Speak ein höherwertiges Exemplar vor, dass aber im k_2 Verhalten nicht besser war.

Einen positiven Einfluss auf niedrige Klirrverzerrungen haben massive Frontplatten aus Metall statt aus Kunststoff, nicht nur bei den Kalotten. So hat der Vifa XT300 K/4 3 mit Kunststoffplatte höhere Klirrverzerrungen als der XT 300V/4.

Magnetostaten haben meist von Haus aus massivere Schwingungsarme Metallfrontplatten. Vielleicht ein Grund für subjektive Befürwortungen für Magnetostaten. Es gibt bei den

unterschiedlichen Hochtönern keine Konstruktion, die herausragend gutes akustisches Phasenverhalten zeigt. Im Gegenteil, Magnetstakenkonstruktionen und Hörner mit besonders langer Schallwandführung haben stärkere akustische Phasenänderungen als normale Kalottensysteme.

2.6.3.2. Elektrodynamische Tief- und Mitteltöner

Die konkaven Konusformen, die größer als die Spulendurchmesser sind, werden für die Luftverdrängung bei tiefen Frequenzen effektiver, da sie wie ein Kolben wirken. Im Gegensatz zu den Kalottentönern haben sie größere Frequenzbereiche mit konstanter fast 0° akustischer Phase, die erst ab der Bündelungsfrequenz immer negativer wird, egal ob mit Phaseplug oder mit Dustcap.

Je größer die Schwingspule ist, desto höher ist ihre elektrische Belastbarkeit. Je höher die abstrahlende Frequenz eines Konusstiefentöners, desto höher ist die Bedeutung der sogenannten „Staubschutzkalotte“, nämlich der Membran über der Spule, die den engen Ringspalt vor dem Eindringen von Staub, Fasern und schwerflüchtigen Stoffen (Teer, Öle etc.) schützt. Membranen ohne Staubschutzkalotte brauchen einen speziell geformten „Phaseplug“, der die hohen Frequenzen aus der Spulennähe vor gegenseitiger Auslöschung schützt und in die Vorzugsabstrahlrichtung umleitet. Durch die Vermeidung einer luftdichten Staubschutzkalotte kann die Schwingspule besser durch die Umgebung gekühlt werden. Es besteht aber auch die Gefahr, dass bei sehr schnellen und starken Impulsen die Luftströmungen hörbar werden. Ein weiteres Risiko ist die Verschmutzbarkeit des sehr engen Spaltes zwischen der Polplatte und der Spule. Dieser muss möglichst eng sein, damit das Magnetfeld möglichst stark und homogen ist. Eine Verschmutzung erhöht die Verzerrungen. Staubschutzkalotten bewirken vor allem unter Mitwirkung einer Polkernbelüftung die Ausbildung einer schmalbandigen Helmholtzresonanz, die außer einer Klirrhöhen bei hohen Leistungen eine Ausschwingverzögerung mit sich bringt.

Ist die Spulenlänge größer als die Ringspalthöhe spricht man von Überhangspulen, die von den Chassisherstellern bevorzugt wird, da sie außer einen besseren Wirkungsgrad eine noch einigermaßen gute Linearität bei minimalen Magnetkosten haben. Das Gegenteil sind die Unterhangspulen, sie haben eine ausgezeichnete Linearität, die aber nur über kurze Strecken reicht und damit nur geringe Membranhübe ermöglicht, man braucht dann größere Membranflächen und stärkere Magneten, was den Preis hochschraubt. Bei Überhangspulen ist die über den Polplatten stehende Spulenabschnittlänge X_{in} , bei der noch eine konstante Anzahl von Windungen im Ringspalt verbleibt. Bei einem Hub von $X_{in} + 15\%$ ergibt sich ein Verzerrungswert k_3 von bereits ca. 3% [15]. Die Zunahme der Verzerrungen k_3 z.B. von 0,15% bei einem Watt im Betriebsnennbereich sollte bis $X_{in} + 15\%$ einen exponentiellen Verlauf haben. Die harmonischen Verzerrungen k_2 , die in der gleichen Größenordnung liegen, werden durch den Gegeninduktionseffekt der Spulenbewegung in ihrem eigenem Magnetfeld und dem des Magneten verursacht. Fast alle Tiefmitteltöner, die bis zum Hochtöner übertragen sollen, weisen gerade im kritischen Mittenbereich Nebenresonanzen und Klirrmaxima bis z.T. über 1% auf, wohingegen sonst 0,4% unterschritten werden. Nebenresonanzen und Klirrmaximabereiche korrelieren oft. Je kleiner die Membrandurchmesser unter 16cm werden, desto geringer ist die Zahl quasi fehlerfreier Mittenbereiche. Gerade kleine Tiefmitteltöner unter 10cm Membrandurchmesser und reine Mitteltöner, die für den Mittenbereich entwickelt worden sind, machen da keine Ausnahme. Auch dort gibt es nur ganz wenige Exemplare. Meist sind klirrärmere Typen eher bei den 13ern zu finden als bei den 10ern.

Einige Hersteller geben noch den Parameter X_{max} an, bei dem die Schwingspule oder deren Verlängerung entweder im Magneten irgendwo anstößt oder die Sicke ist gerade soweit gestreckt, dass sie noch nicht überdehnt wurde.

Außer den Verzerrungen durch die Schwingspule, sozusagen mit Ferritmantel, werden durch die Membran selbst noch zusätzliche Verzerrungen erzeugt, denn sie ist kein unendlich steifer Kolben, sondern sie verformt sich in Abhängigkeit von der Frequenz und abgestrahlter Leistung, da sie eine eigene endliche Schallgeschwindigkeitskonstante aufweist. Grundsätzlich zeigen alle geometrisch gleichen Membranen ähnliche Verformungsmuster, sogenannte „Schwingungsmoden“. Es gibt radiale (nach außen strahlenförmig liegende) und konzentrische (ringförmig um die Schwingspule) Moden. Die radialen Modi entstehen bei tieferen und die konzentrischen bei höheren Frequenzen.

Radiale werden durch Taumelbewegungen in der Membranebene hervorgerufen und die konzentrischen Wellen formen sich, wenn die Schwingspule dem Membranrand vorausseilt, d.h. bei niedrigen Schallgeschwindigkeiten in der Membran, wie z.B. Pappe.

Eine an sich unverständliche Konvention ist die einseitige Anbringung der elektrischen Leiterzuführung zur Schwingspule über Litzen und Chassismembran. Die Trägheit der Cu-Litzen und die Masse der Verklebung schieben den Schwerpunkt der dynamischen Masse aus dem Zentrum der Schwingspule, dies sollte das erste Taumeln der Membran einleiten, noch bevor es zu Membranaufbrechungen kommt, und zu tieferen Frequenzen hin verlagern als es bei symmetrischer Anordnung möglich sein sollte.

Mit höheren Frequenzen nähert sich das Verhältnis der Fläche „in Phase“ zu der, die sich in gegensätzlicher Phase befindet immer mehr „1“ an. Weil sich konzentrische mit radialen Moden überlagern und der Schalldruckpegel sich dadurch immer stärker verringert, entsteht der sogenannte „Rolloff“. Dieser Effekt wird durch die Masse der schwingenden Einheit und der Induktivität der Spule unterstützt. Ist die Eigendämpfung der Membran zu schwach, dann kommt es zu sogenannten Aufbrechungen kurz bevor der Schalldruck abnimmt und die Moden schwingen mit höherer Amplitude als der Durchschnittspegel. Dort bündelt die Membran die Schallabstrahlung. Dadurch entstehen Verzerrungen bis zu einigen Prozent. Weitere Faktoren zur Erzeugung von Verzerrungen sind die Komprimierung der Luft hinter der Membran, die dortigen Reflexionen, die Veränderungen der Impedanz durch den positiven Temperaturkoeffizienten der Spule, die ungenügende Dämpfung der Schwingungsmoden der Membran durch die äußere Sicke und durch die Resonanzen der Zentrierspinnenaufhängung. Diesen Faktoren kann mit weiteren geeigneten Maßnahmen entgegengewirkt werden, z.B. durch Wärmeabführung der Schwingspule, durch Belüftung der komprimierten Bereiche, durch eine nicht konstante geometrische Form und durch Einführung von Verbundmaterialien für alle schwingenden Bereiche wie Sicken, Membranen, Zentrierspinnen, Schwingspulenträger usw., die in Patenten meist gesichert sind. Auf Grund letzterem gibt es auf dem Markt sehr viel verschiedene Chassis mit ihren Vorzügen aber auch mit ihren Nachteilen, aber keine, die alle entscheidenden Vorteilskonstruktionen in einem vereinigen können. Die Zentrierspinne hat bisher die geringsten Weiterentwicklungen erfahren.

Der Zusammenhang der Membranaufbrechung und dem Durchmesser der Membran ist ab der 13cm Klasse (effektiver Membrandurchmesser mit Sicke 10cm) ziemlich linear. Unterhalb nimmt die Materialeigenschaft der Staubschutzkalotte und deren Konstruktion wie Verklebung o.ä. zunehmend Einfluss, sie ist es, die dann der membranbedingten zu frühen (10er Mittelton-Chassis theoretisch bei 1,4kHz!) Bündelung entgegenwirken kann.

Einstoffmembranen zeigen intensivere Membranaufbrechungen als Verbundstoffmembranen, noch deutlicher werden Membranaufbrechungen unterdrückt, wenn der strukturelle Aufbau der Membran optimiert wird, z.B. Wabenversteifung oder spiralförmiges Einschneiden mit erneuten Verkleben oder z.B. eine Gewebemembran wird getränkt bzw. beschichtet. Der Einfluss der Staubschutzkalotte ist aber trotzdem im Hochfrequenzverhalten nicht zu unterschätzen. Bei den keramischen Membranen dämpft die Porosität, da die Hohlräume eine andere Schallgeschwindigkeit haben als die Keramik selbst.

Chassis mit Metallmembranen zeigen zwar keinerlei Ausschwingverzögerungen oder Nebenresonanzen zwischen der Hauptresonanz und dem Membranaufbrechen, aber desto intensiver sind letztere. So bringt eine konservative Mittel-/Hochtontrennung bei 4kHz mit 12dB/Oktave die Membranaufbrechungen gerademal auf den Pegel der Membranempfindlichkeit SPL/W. Man kann auch steilere Filter verwenden und tiefere Einsatzfrequenzen oder Saugkreise mit hoher Güte.

Die in der Tabelle ausgewiesenen Resonanzfrequenzen korrelieren, wenn auch nicht ganz so klar mit der Schallgeschwindigkeit des Membranmaterials. Je größer die Schallgeschwindigkeit, desto höher liegt die Resonanzfrequenz.

Hier stellt sich eine Frage: Hat es überhaupt Sinn Membranen mit intensiven Aufbrechungen zu verwenden, wenn der darüberliegende Hochtöner oder Mitteltöner diese Membran vielleicht doch noch zum nachhaltigen Ausschwingen anregt?

Diese Frage kann vielleicht z.T. beantwortet werden, wenn man sich die „Beck AL4“ Standlautsprecher in Stereo 4/2000 [16] anschaut. Die genutzten 15er Mittelton Al-Chassis brechen ab ca. 3kHz auf. Der Tiefpass für den Mitteltoner wird konventionell so bemessen, dass der Beginn der Membranaufbrechungen mit -12dB bedämpft wird, da die Trennfrequenz 2,5kHz beträgt und mit 24dB/Oktave nach Linkwitz-Riley gefiltert wird. Trotz dieses selten anzutreffenden steilen Filters muss der Konstrukteur den Gesamt-Schalldruckpegel bewusst bei 3,5kHz nochmal um bis zu 6dB (1 Oktave breite -6dB Senke) zurücknehmen, obwohl das Resonanzmaximum noch höher liegt und dem Lautsprecher immer noch keine Brillianzarmut zugesprochen werden kann, im Gegenteil. Das bedeutet, der Klirr der Membranaufbrechungen trägt so viel zur Klangbalance bei, dass, obgleich die Schallpegelspitzen der Aufbrechungen unter der planmäßigen gemessenen Pegellinie liegen, der obere Präsenzbereich um die Hälfte des Pegels abgesenkt werden muss. Die Absenkung endet bei 7kHz. Wer hört schon die k_2 mit der Frequenz von 14kHz und erst die k_3 mit 21kHz, und wenn ... dann ist das für „alle Liebhaber eines besonders frischen, attackigen Klangbildes“ [16].

Viele Membranen haben kleine Nebenresonanzen im Betriebsnennbereich. Am häufigsten ausgeprägt sind diese bei Polypropylenmembranen. Diese werden den Grund- und Mitteltonbereich besonders bei Stimmen und klassischen Instrumenten unnatürlich verzerren. Es scheint eine Grundtendenz bei den Chassis mit unzureichenden Verbundstoffkombinationen und einfachen Struktur Aufbau zu geben: Je stärker die intensiven in der Frequenz hochliegenden Membranaufbrechungen mit vielen Spitzen unterdrückt werden, desto tiefer liegen diese und weniger intensive Spitzen haben sie, trotzdem bleiben oft die Ausschwingverzögerungen erhalten, die im zeitlichen Ablauf sich zu anderen Frequenzen hin verlagern können.

Tabelle: Übersicht der Resonanzfrequenzen von Membranaufbrechungen und dem maximalen Schalldrucküberhöhungen

Chassistyp	Material	Resonanz kHz	SPLü dB
Eton 5880/25Hexb	Kevlar	2,8	+1
Harwood LF5XP	XP	3,0	+2
Peerless HDS 134	PP	3,0	+0
ATD TPX 130	TPX	3,5	+3
Focal 5V4411	Polyglass	3,7	+2
Audax HM130Z12	HD-A	3,8	+1
Cabasse 13M15M	Hartschaum	4,0	+5
Morel H5.1	PP	4,0	+3
Audax HM130GO	Papier	4,0	+3
Audax HM130CO	C-Faser	4,5	+2
ATD Hypergraph 130K	C-Faser	5,0	+4
Davis 13KLV5MA	Kevlar	5,0	+5
Seas W14AL	Al	5,7	+16
Alcone Al5.25HES	Al	6,0	+12
Swaans F59	Kevlar	6,1	+8
E.J.Jordan JX92S	Al	7,5	+3
Visaton AL130	Al	8,0	+15
Excel W15CY001	Mg	8,1	+16
Excel W14CY001	Mg	8,3	+15

Werden normale Konusmittel- und Tieftöner in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut, verringern sich fast immer die Klirrverzerrungen und das Ausschwingverhalten verbessert sich bis auf wenige gehäuseinternen Reflektionen gegenüber offenen Schallwänden. Hauptsächlich ist der Grundton- und Tieftonbereich betroffen. Wird durch ein Bassreflexrohr das Gehäuse partiell geöffnet, verzögert sich das Ausschwingen und der Tieftonklirr wächst an. Transmissionskonstruktionen erhöhen diese Effekte nochmals. Zu große geschlossene Gehäuse, wie z.B. 1m³ für einen 13er Tiefmitteltöner, wie sie zur Vermessung „an unendlicher Schallwand“ genutzt werden, wirken wie offene Schallwände auf das Ausschwing- und Klirrverhalten .

2.6.3.3. Koaxialtöner

Koaxiallautsprecherchassis sind meist Kombinationen aus einem Konustieftmitteltöner mit einem Kalottensystem. Koaxiallautsprecher sind leistungsfähiger als Breitbandlautsprecher und bringen die richtigeren Klangfarben. Es ist natürlich objektiv schwierig 2 Magneteinheiten konzentrisch anzubringen, ohne dass zuviel Leistungsfähigkeit für den Hochtöner verloren geht. Mit den neuen Neodymmagneten scheint das Problem lösbar zu sein. Es gibt 2 Gruppen von Koaxialchassis, solche die ihre Magnetsysteme ineinander integriert haben (co-incident) und wo die Hochtönermembran bündig mit des Tieftöners abschließt, und solche wo die Hochtönermembran mit ihrer Magneteinheit hervorsteht. Im letzteren Fall bleiben innere Reflexionen und das Risiko, dass die hervorstehende Einheit ab einer bestimmten Leistung zum Schwingen angeregt wird. Im ersteren Fall wird die Hochtönerabstrahlung unregelmäßig ähnlich wie die von Breitbandkonusmembranen und das Ausschwingen wird oft verzögert oder wellig in der Sprungantwort.

Im Klirrniveau bleiben sie unter dem Niveau von guten separaten Konus-Kalottensystemen. Zur Bewertung der akustischen Abbildung durch das vertikale Zusammenlegen der beiden Treiber werden leider keine Messungen gefunden. In einem Artikel von Enrico Cecconi et.al. [17] kann man erkennen, dass der Einbau eines Hochtöners in den Bereich, wo ansonsten die Staubschutzkalotte sitzt, den Vorteil hat, dass das Rundstrahlverhalten des Hochtöners sich um fast eine Oktave auf 18kHz = 0dB verbessert, die Frequenzganglinearität auf Achse sich aber von 32kHz auf 19kHz verschlechtert. Allerdings werden Filter höherer Ordnung ungünstig, da die Zeitdifferenz die Anordnung verschlechtern würde. Die sogenannte Uni-Q Technologie von KEF wird allerdings mit einem gelochten Metallschutzgitter vor dem Hochtöner praktiziert. Laut Broschüre scheint dennoch eine Frequenzweiche 4.Ordnung zu wirken.

2.6.3.4. Breitbänder

Breitbänder haben im Hochtönenbereich meist starke Amplitudenschwankungen und schon ein verzögertes Ausschwingen im Mitteltonbereich. Die Klirrverzerrungen sind nur bei wenigen Exemplaren mit großen Membranen (> 6“) ausreichend gering (< 0,5%). Dafür haben größere Membranen auch ein stärkeres Bündelungsverhalten. Oft findet man nicht nur bei älteren Breitbändern mit Papiermembranen aufgesetzte Hochtönerkonusmembranen aus dem gleichem Material.

Zu den Breitbändern gehört der BiegeWellenwandler. Der Manger Wandler ist in [18] getestet worden. Der Klirr erreicht mit einigen Spitzen bei 90dB bis 3% im Mittenbereich. Die Sprungantwort zeigt einen ersten großen und einen nachfolgenden kleinen Überschwinger. Der Impedanzverlauf ist wellig und der akustische Phasengang ist nicht besser als normale Konustieftmitteltöner. Impedanzspitzen und Klirrmaxima korrelieren auffällig. Die Anhörung auf einer Messe überraschte insofern, dass so ein diffuses bzw. verzerrtes Abbild nicht erwartet worden war, obwohl die Diagramme bekannt waren.

[1] HÖRMAL, Lautsprechermagazin, 1996, Heft 3, s.33, Hörmal! Verlag

[2] www.etongmbh.com

[3] Klang+Ton 1/1996, S.32

[4] Hifisound Datenbank 1996

[5] HobbyHiFi 6/1999 S.54

[6] HobbyHiFi 2/2001 S.14

[7] Klang+Ton, 4/2000, S. 64-65

[8] HobbyHiFi 1/2000, S.18

[9] HobbyHiFi 1/2004, S.59

[10] Klang+Ton 5/2001, S.23

[11] www.audio-consequent.de 2001

[12] „Frequenzweichen für Lautsprecher“ (Franzis Taschenbuch Nr.236) 1991

[13] G.Schwamkrug. Lautsprecher Dichtung und Wahrheit, Elektor Verlag 1986

[14] G.Schwamkrug, Lautsprecherboxen Aufbau Umbau Nachbau, Elektor Verlag 1989, S.109

[15] M.Gander „Moving coil loudspeaker topology as an indicator for linear excursion capability“ J.A.E.S. Jan./Febr. 1981

[16] Stereo 4/2000 Test Lautsprecher S.62 ff.

[17] www.kef.com/technologyuniq 1995

[18] Klang+Ton, 1/2003