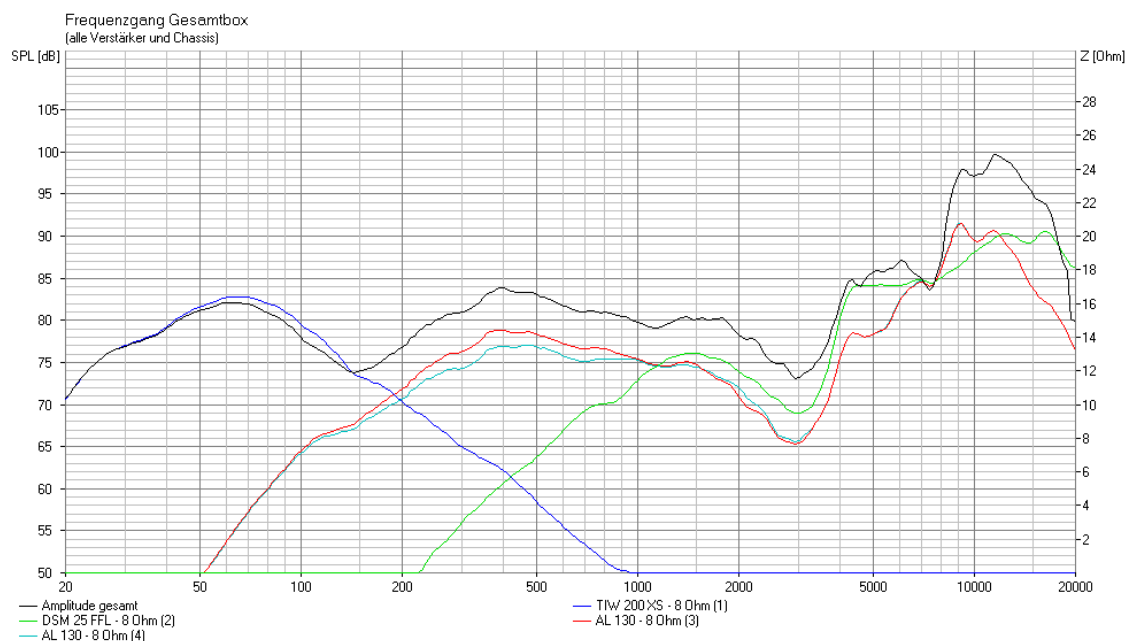


Projektarbeit

Von der Akustik zum Lautsprecher



vorgelegt von
Ronny Tabel Matrikelnummer.:161680

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Horst.Crome

Inhalt und Ergebnisse dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der Hochschule Bremen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Hochschullehrers ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.

Ort, Datum, Unterschrift

Inhalt

1	<i>Physikalische Grundlagen</i>	7
1.1	Physikalische Größen des Schallfeldes	7
1.2	Schall , Luftschall, Körperschall	8
1.3	Schallausbreitung	9
1.4	Reflexion und stehende Wellen	10
1.5	Ton und Klang	12
1.6	Das menschliche Gehör	13
2	<i>Klangverfälschung</i>	14
2.1	Klangverfärbungen	14
2.2	Partialschwingungen	14
2.3	Interferenzen	15
2.4	Klirrfaktor	16
2.5	Dopplerverzerrungen	16
3	<i>Lautsprechergehäuse</i>	16
3.1	Gehäuse Auswahl	16
3.2	Bassreflexgehäuse	17
3.3	Marktforschung Bassreflexlautsprecher	19
3.4	Bassreflexabstimmung	20
3.5	Hogesches Näherungsverfahren	21
4	<i>Der Mittel.- und Hochtonbereich</i>	24
4.1	Akustische Aufhängung	24
4.2	Parallelschaltung von Chassis	25
4.3	Berechnung vom geschlossenenem Gehäuse	25
4.4	Hochtonbereich	27
5	<i>Gehäuse Konstruktion</i>	27
6.	<i>Gehäuse Dämpfung</i>	33
7.	<i>Frequenzweiche</i>	33
8.	<i>Zusammenfassung</i>	34
9.	<i>Literaturverzeichnis</i>	37
10.	<i>Webverzeichnis</i>	38
11.	<i>Anhang</i>	39
11.1	CAD Daten [in digitaler Form]	39
11.2	Zeichnungssatz [in digitaler Form]	39
11.3	Berechnungen in Excel [in digitaler Form]	39
11.4	FEM Analysen [in digitaler Form]	39
11.5	Berechnungen in Boxim + Beschreibung [in digitaler Form]	39
11.6	Bildergalerie der praktischen Fertigung [in digitaler Form]	39
11.7	Dokumentation [in digitaler Form]	39
11.8	Frequenzgang mit Weichenschaltbild	40
11.9	Kostenaufstellung	41
11.10	Projektlaufplan	42
11.11	praktischer Nachweis	43

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Schallwellen- Verdichtungen und Verdünnung der Luft	8
Abb. 2 punktförmige Schallquelle	9
Abb. 3 Wellenlänge Lambda	9
Abb. 4 Beugung von Schallwellen	10
Abb. 5 Stehende Wellen zwischen zwei parallelen	11
Abb. 6 Darstellung eines Tons im Oszilloskop	12
Abb. 7 Darstellung eines Klangs im Oszilloskop	12
Abb. 8 Darstellung eines Geräusches im Oszilloskop	12
Abb. 9 Hör- und Schmerzschwellenkurve, Kurven gleicher Lautstärke	13
Abb. 11 3-Wegelautsprecher mit möglicher Interferenzbildung zur Bezugsebene	15
Abb. 10 Konuslautsprecher Partialschwingungen	15
Abb. 12 Bassreflexsystem im Fall c	17
Abb. 13 Impedanzverläufe im Vergleich	18
Abb. 14 VOX253	19
Abb. 15 VOX253 Explosionszeichnung	19
Abb. 16 Bestimmung von a und h	20
Abb. 17 Vergleich der Frequenzgänge einer geschlossenen und einer Bassreflexbox	22
Abb. 18 Frequenz und Volumen über Q_{Tc}	23
Abb. 19 Frequenz und Volumen über Q_{Tc}	26
Abb. 20 Grundkörper	27
Abb. 21 Chassis Anordnung	28
Abb. 22 1 Eigenresonanz nach der Optimierung	28
Abb. 23 1 Eigenresonanz der VOX253	28
Abb. 24 gleichmäßig verteilte Lagerung	29
Abb. 25 ungleichmäßige Lagerung	29
Abb. 26 geschlossenes Gehäuse	30
Abb. 27 Bassreflexvolumen	31
Abb. 28 Explosionszeichnung	32
Abb. 29 eingebaute Frequenzweiche	33
Abb. 30 CAD Zeichnung	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Excel Kalkulation Bassreflex	23
Tabelle 2 Excel Kalkulation geschlossen	26
Tabelle 3 Kostenaufstellung	41

Verzeichnis der verwendeten Größen

α	Verhältnis zwischen V_{AS} und V_B	[l]
f_b	Gehäuseresonanzfrequenz eines Bassreflexgehäuses	[Hz]
f_c	Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechers (geschlossenes Gehäuse)	[Hz]
f_s	Freiluftresonanzfrequenz	[Hz]
h	Verhältnis zwischen f_b und f_s	[-]
Q	Güte-Faktor	[-]
Q_{TS}	Güte-Faktor des nicht eingebauten Lautsprechers	[-]
Q_{TC}	Gütefaktor des eingebauten Lautsprechers	[-]
R_L	Ohmscher Widerstand der Spule auf der Frequenzweiche	[Ω]
R_{DC}	Gleichstromwiderstand der Schwingspule	[Ω]
V_{AS}	äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen	[l]
V_B	Gehäusevolumen eines Lautsprechers	[l]
a, b, c, h	verwendete berechnungsvariablen	[mm]

Vorwort

In der heutigen Wirtschaftslage bestimmt die schnelle und daraus resultierende billige Massenanfertigung den Markt. Sicherlich ist es möglich, bei solch einem vielseitigen Angebot von Lautsprecher –Kombinationen, ein spezielles zu wählen. Doch auch diese sind Massenanfertigungen und erreichen nur das untere Qualitätsniveau, was Klang und Verarbeitung betrifft. Für einen gut klingenden Lautsprecher muss auch meist viel investiert werden, wobei hierfür bis zu 70% der Investition, in die Logistik (Made in Taiwan) und den Herstellernamen fließen. Doch diese Investition kurbelt vielleicht die Wirtschaft an, aber eine sinnvolle für meinen Hörgenuss ist sie nicht.

Der Selbstbauer kann hier eingreifen und durch den Gehäuseselbstbau das gesparte Geld in hochwertige Frequenzweichen und Chassis investieren. Hinzu kommt die spezielle Feinabstimmungen der Frequenzweiche und die genau Berechnung der Lautsprecherdimensionierung.

In diesem Projekt, werden die grundlegenden Begriffe der Lautsprechertechnik erklärt und die mathematischen Zusammenhänge zwischen Chassis, Gehäusebau und Design dargestellt. Besonderer Wert wird darauf gelegt, dass durch den Selbstbau eines Lautsprechers im Vergleich einer gleichteuren Industriebox, wesentlich hochwertigere Ergebnisse erzielt werden können.

Am Ende des Projekts wird ein eigen entwickelter Lautsprecher stehen und dem Prof. Dr. phil. Horst Crome zur Klangbeurteilung vorgespielt. Herr Crome besitzt unter anderem ein sehr ausgeprägtes Fachwissen was die Akustiklehre angeht, für mich ist seine Beurteilung von höchster Wertschätzung und für den Lebenslauf der Lautsprecher von großer Bedeutung.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Crome dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat dieses Projekt zu bearbeiten. Mein Dank geht auch an Herrn Kahle aus dem Studio 45 in Bremen, welcher mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Mit diesem Projekt habe ich mir ein großes Ziel gesetzt, es soll hier nicht nur die Theorie sondern auch dessen praktische Durchführung bearbeiten werden. An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Frau Credit für die handwerkliche und zeitintensive Unterstützung bedanken.

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Physikalische Größen des Schallfeldes

Der Raum in dem sich eine Schallwelle ausbreitet, wird in der Akustik als Schallfeld bezeichnet. Zur Beschreibung des Schallfeldes stehen folgende physikalische Größen zu Verfügung:

- Schalldruck / Schallpegel

Der Schalldruckbereich den unser Gehör wahrnehmen kann, liegt zwischen $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ und 20 N/m^2 . Um diesen Bereich mathematisch leichter erfassen zu können wird die logarithmische Größe Dezibel (dB) eingeführt. Ein Schalldruck von $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ entspricht einem Schallpegel von 0 und ein Schalldruck von 20 N/m^2 einem Schallpegel von 120 dB. Eine Erhöhung des Schalldruckpegels von 10 dB wird als Verdopplung wahrgenommen.

- Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit ist ein Maß dafür, wie schnell sich der Schall in einem bestimmten Medium ausbreitet und ist hierbei Frequenzunabhängig.

Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien:

Luft =	343 m/s
Wasser =	1440 m/s
Aluminium =	6260 m/s

- Schalleistung

Die Schalleistung ist die von der Schallquelle abgegebene Energie in Abhängigkeit von der Zeit. Die Schalleistung wird angegeben in Watt. Als Beispiel folgen einige Musikinstrumente mit ihrer möglichen Schalleistung:

Trompete =	0,3 W
Klavier =	0,5 W
Pauke =	12 W
Sinfonieorchester =	70 W

1.2 Schall , Luftschall, Körperschall

Schallwellen sind aus der physikalischen Sichtweise betrachtet Druckschwankungen in einem elastischen Medium. Einzelne Moleküle gelangen durch äußere Anregungen aus Ihrer Gleichgewichtslage und schwingen periodisch um Ihren Ausgangsort. Die Bewegungen werden auf benachbarte Teilchen durch anstoßen übertragen. Es kommt zu Verdichtungen und Verdünnungen der Materie und somit zur Fortpflanzung des Schalls.

Der Schall wird in drei wesentliche Untergruppen aufgeteilt, Luftschall, Körperschall und Schall in Flüssigkeiten. Im Vakuum gibt es keine Schallausbreitung, da keine Materie vorhanden ist. Zur fortlaufenden Bearbeitung des Projekts wird nur der Luftschall benötigt. Der wahrnehmbare Luftschall ist ein Druckunterschied der dem natürlichen Luftdruck überlagert ist. Wobei das menschliche Gehör diese Druckschwankungen nur in einem Bereich von 20 bis 20000-mal pro Sekunde deuten kann. Die Häufigkeit des Luftdruckwechsels nennt man Frequenz und wird gemessen in Hz. Die Frequenz bestimmt die Tonhöhe. Weitere wichtige Größen sind hier die Amplitude, welche den Ausschlag der schwingen Teilchen um Ihre Ruhelage beschreibt mit ihr wird die Lautstärke bestimmt. Die Dauer eines Luftdruckwechsels bis zum nächsten ist die Periode. In einer Periode legt die Schallwelle genau die Strecke zurück die ihrer Wellenlänge entspricht.

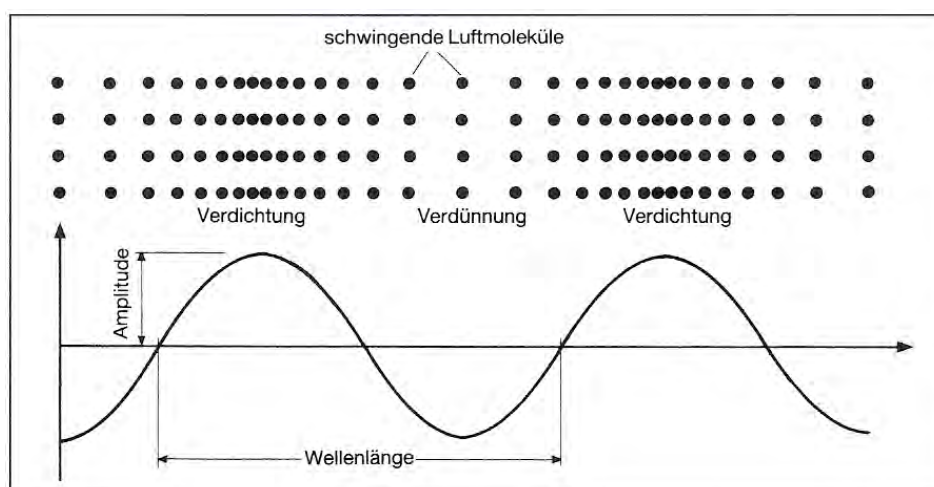


Abb. 1 Schallwellen- Verdichtungen und Verdünnung der Luft

1.3 Schallausbreitung

Eine Schallquelle kann als punktförmig betrachtet werden, sofern die Ausdehnung sehr viel kleiner ist als ihre Wellenlänge. Die Ausbreitung einer punktförmigen Schallquelle folgt in Form von sogenannten Kugelwellen.

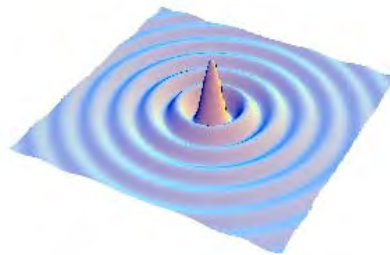


Abb. 2 punktförmige Schallquelle

Die Wellenlänge lässt sich aus Geschwindigkeit und Frequenz nach folgender Formel berechnen:

$$V = \lambda * f$$

V= Schallgeschwindigkeit (in Luft:343m/sec)

λ = Wellenlänge (m)

f= Frequenz (1/s=Hz)

Beispiel:

f= 34 Hz

$$\Rightarrow \lambda = \frac{343ms}{34s} \approx 10m$$

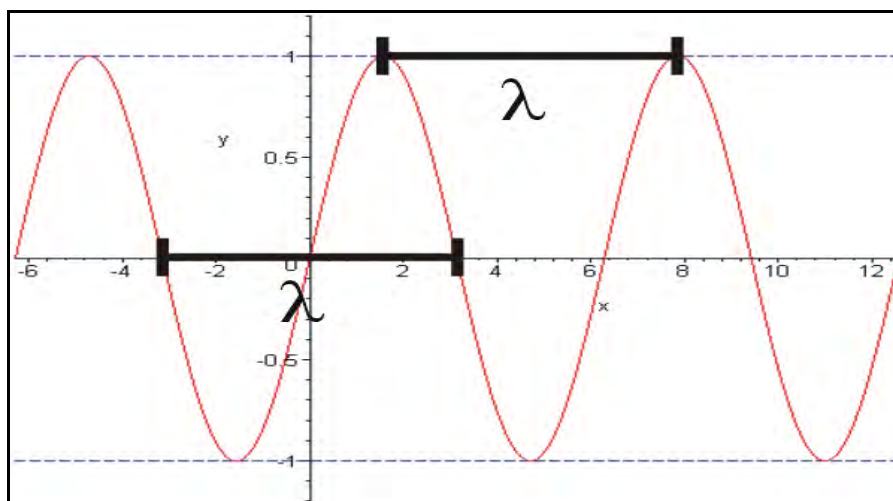


Abb. 3 Wellenlänge Lambda

Ein Tieftonlautsprecher mit der Frequenz von 30 Hz kann als punktförmige Schallquelle angesehen werden. Bei Hochtönern mit einer Frequenz von 10 KHz und einer Wellenlänge von 3,4 cm ist ein extrem kleiner Membrandurchmesser notwendig. Ist der Membrandurchmesser größer als die Wellenlänge, so erfolgt die Schallabstrahlung stark gerichtet.

Trifft beispielsweise eine Schallquelle auf eine Öffnung in einer Wand, so breitet sich die Schallwelle dahinter kugelförmig aus, sofern die Öffnung kleiner ist als die Wellenlänge. Die Öffnung dient hier als neue punktförmige Schallquelle. Trifft die Schallwelle dagegen auf eine größere Öffnung als ihre Wellenlänge ist, so breitet sich die Schallwelle dahinter gleichförmig aus.

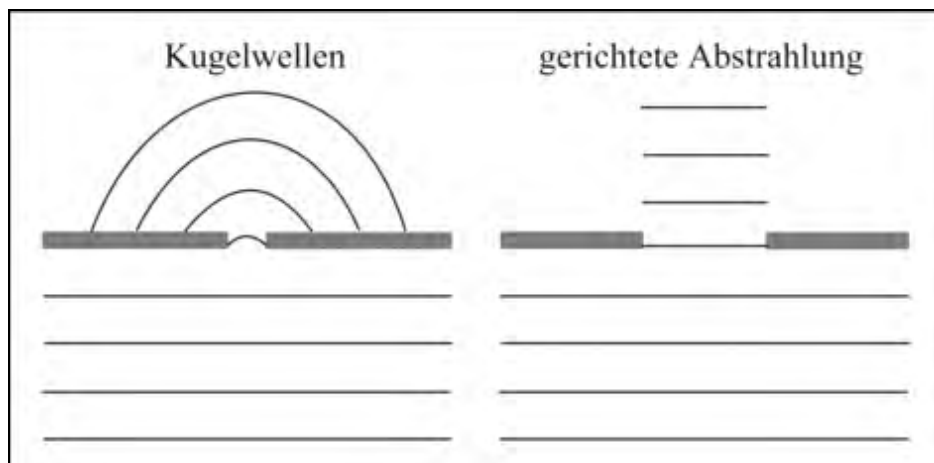


Abb. 4 Beugung von Schallwellen

1.4 Reflexion und stehende Wellen

Trifft eine sich ausbreitende Schallwelle unter einem bestimmten Winkel auf ein Hindernis, dann wird die Welle unter demselben Winkel reflektiert. Das heißt, trifft eine Schallwelle unter einem Winkel von 90° zum Hindernis auf das Hindernis, begegnen sich die ursprüngliche Welle und die reflektierte Welle. Es kommt zur Ausbildung von stehenden Wellen, wenn die Raummaße in einem ganzzahligen Verhältnis zur halben Wellenlänge stehen, z.B. wenn die halbe Wellenlänge λ zwischen die Wände passt. Wenn die Wände einen Abstand von $l = 8$ m haben, dann gilt:

$l = 8m = \lambda_{st} \Rightarrow \lambda_{st} = 16m$ Mit λ_{st} lässt sich die Frequenz der stehenden Welle f_r wie folgt berechnen:

C = Schallgeschwindigkeit der Luft
 f_r = Frequenz der stehenden Welle

$$f_r = \frac{C}{\lambda_{st}} = \frac{343m}{16ms} \approx 21Hz$$

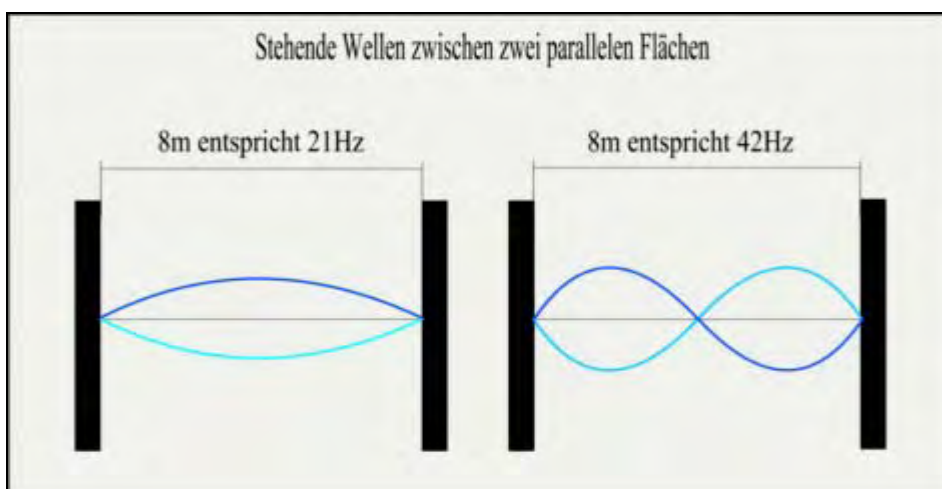


Abb. 5 Stehende Wellen zwischen zwei parallelen

Die Grundresonanz der stehenden Welle liegt also bei 21 Hz. Es können sich aber noch weitere stehende Wellen bilden, welche sich mit folgender Gleichung berechnen lassen:

$$f_r = \frac{C}{2 * l} * n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Stehende Wellen spielen in der Akustik eine große Rolle und sind beim Lautsprecherbau teils erwünscht (Transmission – Linien – Box) teils unerwünscht (Raum Resonanzen)

1.5 Ton und Klang

Ein Ton ist eine Sinusschwingung, welcher durch eine einzige Frequenz erzeugt wird. Der Schall setzt sich in der Natur aus vielen einzelnen Tönen zusammen. Dabei unterscheidet sich der Schall in Klänge und Geräusche.

Klänge entstehen durch Zusammensetzung von Tönen, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zur Frequenz des tiefsten vorkommenden Tons stehen. Beispielsweise erzeugt ein Klavier bei einem einzigen Tastenschlag bereits **einen** Klang, der aus Grund- und Oberton besteht. So enthält ein Klavierklang von 440 Hz noch die Frequenz 88 Hz, 1320 Hz usw. insgesamt 10 oder 20 Obertöne, sehr oft mit abnehmender Intensität. Somit beschreiben die Anzahl und die Zusammensetzung der Obertöne die Klangfarbe des Instruments.

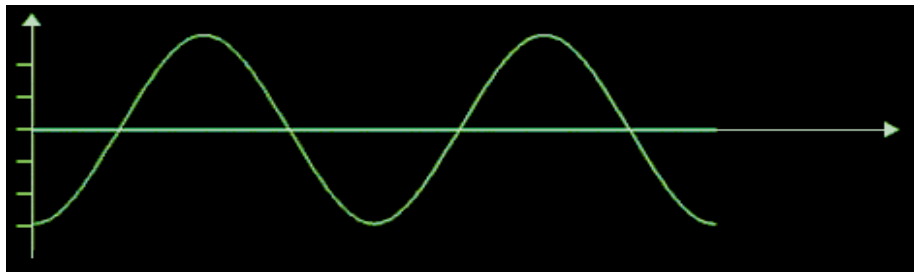


Abb. 6 Darstellung eines Tons im Oszilloskop

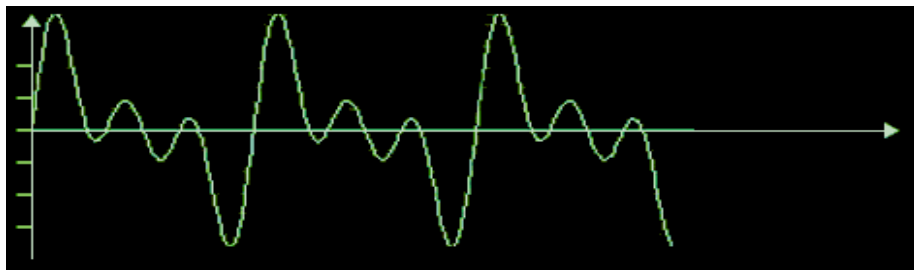


Abb. 7 Darstellung eines Klangs im Oszilloskop

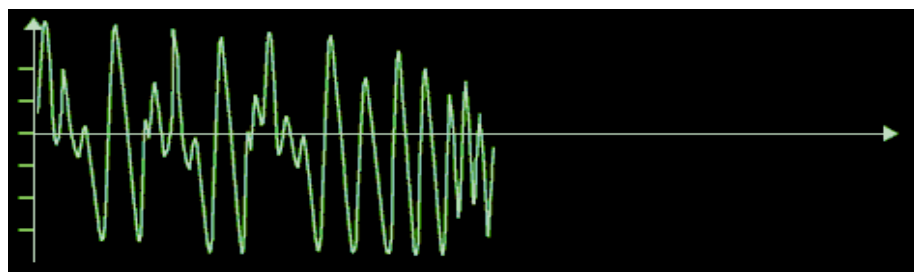


Abb. 8 Darstellung eines Geräusches im Oszilloskop

Hervorragende Animationen von Interferenzen, stehenden Wellen usw. können auf der Seite <http://www.kettering.edu/%7Edrussell/demos.html> verinnerlicht werden.

1.6 Das menschliche Gehör

Das menschliche Gehör ist in der Lage, wie schon in Kapitel 1.1 erwähnt, einen Frequenzbereich von 20 Hz – 20 kHz wahrzunehmen.

- Hörschwelle, Schmerzschwelle

Mit dem Begriff Hörschwelle wird die unterste Schallpegelgrenze beschrieben, an der das Gehör den Schall gerade noch wahrnehmen kann. Die Schmerzschwelle ist der Bereich in dem das Ohr gerade Schmerzempfindungen ertragen kann. Wobei beide Schwellen Frequenzabhängig sind. Das menschliche Gehör ist im Bereich von 700 – 6000 Hz besonders empfänglich. Das bedeutet, dass hier schon ein geringer Schalldruck genügt um diese Frequenzen wahrzunehmen. Im Bereich tieferer Frequenzen ist dagegen ein höherer Schalldruck notwendig.

- Empfundene Lautstärke

Zwei Töne unterschiedlicher Frequenzen mit gleichem Schallpegel werden vom Menschen als unterschiedlich laut empfunden. Beispielsweise wird ein Basston von 50 Hz bei einem Schallpegel von 50 dB genauso laut wahrgenommen wie ein 4 kHz Ton mit 12 db. Die größte Empfindlichkeit liegt bei 4 kHz, was für den Lautsprecher bedeute, dass Fehler, z.B. Klirrfaktoren die in diesem Bereich liegen, wesentlich deutlicher hervortreten als bei höher oder tiefer liegenden Frequenzen. Um eine gleichmäßige Wiedergabe der Frequenzen zu ermöglichen gibt es bei den meisten Verstärkern eine Lautstärkeentzerrung (loudness). Hier wird mit zunehmender Lautstärke ein umgekehrt proportional arbeitender Filter eingeschaltet, welcher den flacher werdenden Verlauf der Ohr kurve anpasst.

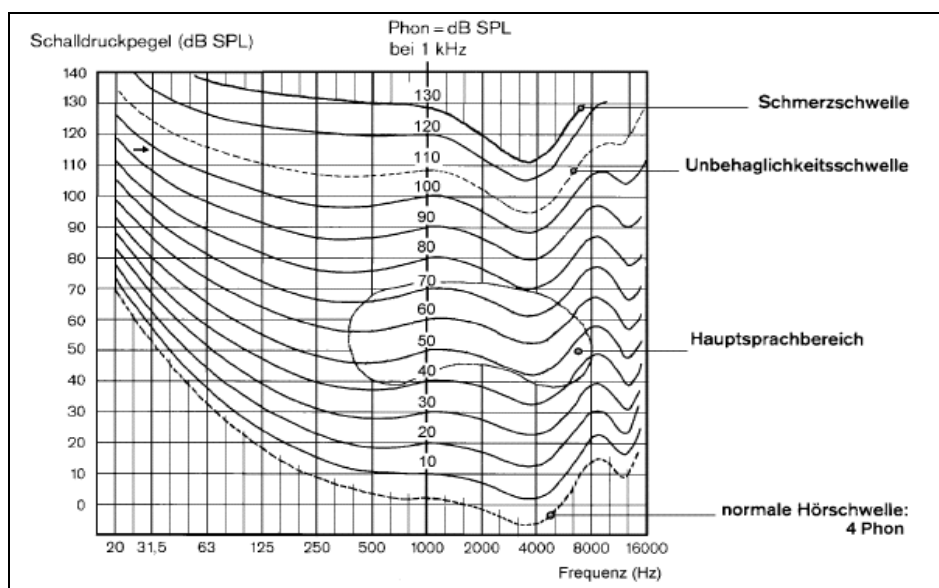


Abb. 9 Hör- und Schmerzschwellenkurve, Kurven gleicher Lautstärke

2 Klangverfälschung

Im Vergleich von Lautsprecher verschiedener Hersteller und Bauarten ist immer wieder festzustellen, dass hier die Klangunterschiede sehr groß sind. Was wohl darauf zurückzuführen ist, dass der Lautsprecher in der HIFI – Kette die schwierigste Aufgabe zu bewältigen hat: die Rückkopplung des elektrischen in ein akustisches Signal. Die dabei erforderlichen extrem hohen Beschleunigungen von relativ hohen Massen sorgen leider für eine negative Auswirkung, was die Klangwiedergabe des Lautsprechers angeht. In diesem Kapitel sollen die schwerwiegenden Probleme dieser Art einmal erläutert werden.

2.1 Klangverfärbungen

Eine Klangverfärbung ist eine Verfälschung des Klangs, welche oft schon dem Laien sofort auffallen. Eine Verfärbung bedeutet dass die Schallanteile unterschiedlicher Frequenzen verschieden stark wiedergegeben werden. Für diese Verfärbungen werden unterschiedliche Fachausdrücke genutzt, wobei die nachfolgenden einmal definiert werden.

dumpf	-	fehlende Höhen
mulmig	-	Frequenzbereich um 150 Hz zu stark
aggressiv	-	Mittenbereich 1 kHz – 5 kHz zu stark
hohl	-	Frequenzgangüberhöhung im Bereich 1000 Hz
spitz, schrill	-	Übertönung der Höhen

2.2 Partialschwingungen

Idealer Weise kann man davon ausgehen, dass sich eine Membran kolbenförmig d.h. in sich starr, vor und zurück bewegt. Jedoch in der Praxis pflanzen sich von der Antriebsspule ausgehend Wellen zum Rand hin fort. (siehe Abb. 10) Dort werden diese Wellen reflektiert, überlagern sich mit der hinlaufenden Welle und können so stehende Wellen (Partial- oder Eigenschwingungen) im Membrankörper bilden. Das bedeutet: es bilden sich frequenzabhängige hin und her Bewegungen der Membran. Das Resultat ist eine Auslöschung der Schallabstrahlung und es entsteht ein zerklüfteter Frequenzgang.

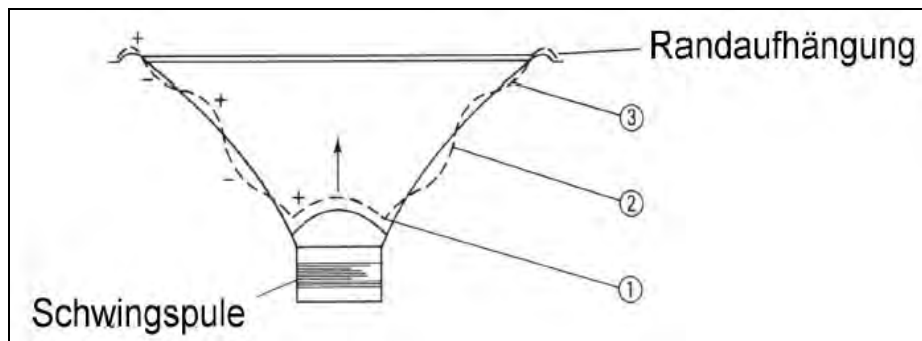


Abb. 10 Konuslautsprecher Partialschwingungen

2.3 Interferenzen

Interferenzen entstehen, wenn zwei Wellenberge oder Täler aufeinander treffen und sich gegenseitig auslöschen oder addieren. Dieses Problem spielt bei Mehrwegeboxen eine große Rolle. Bei einer Dreiwegbox gibt es Frequenzbereiche (die sogenannten Übernahmebereiche), wo Tief- und Mittel-, oder Mittel- und Hochtöner gleichstark abstrahlen. Liegen die Schallanteile hier auf der Bezugsachse addieren sie sich, wobei sie sich unter einem bestimmten Winkel auch völlig auslöschen können. Der eine Anteil kommt später am Hörort an als der andere. Man spricht von Phasenverschiebung. Bei 0° addieren sich die Amplituden und bei 180° löschen sie sich gegenseitig aus. Alle Winkel dazwischen führen zu einem unruhigen Frequenzgang, was eine Klangverfärbung zur Folge hat. Aus diesem Grund sollten die einzelnen Chassis so dicht wie möglich beieinander liegen oder auch nicht nebeneinander angeordnet werden. So ist sichergestellt, dass alle Schallanteile zu jedem Ort der Bezugsachse den gleichen Weg zurücklegen müssen. Ein Lautsprecher sollte so aufgestellt werden, dass sich das Ohr immer in Höhe der Bezugsebene befindet.

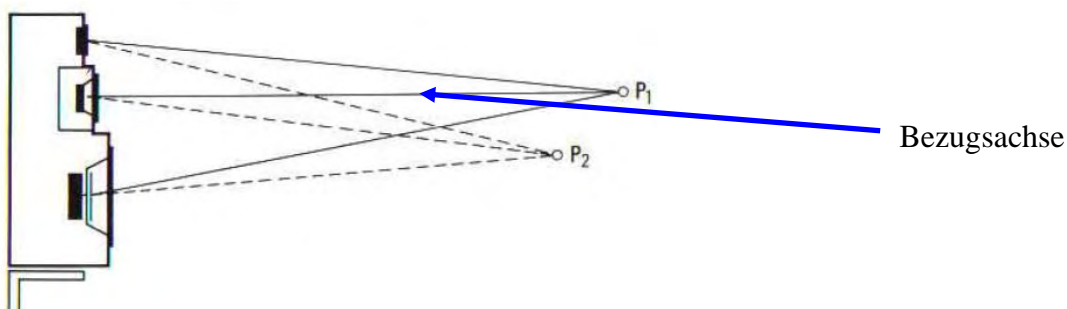


Abb. 11 3-Weg-Lautsprecher mit möglicher Interferenzbildung zur Bezugsebene

2.4 Klirrfaktor

Das Klirren eines Lautsprechers entsteht, wenn die Schwingspule dem Eingangsstrom nicht mehr linear folgen kann. Das heißt entweder ist der Hub einer Membran so groß, dass die Spule das homogene Magnetfeld verlässt oder die Sicke begrenzt denn Hub mechanisch. In beiden Fällen werden die Spitzen der Auslenkungen abgeflacht.

2.5 Dopplerverzerrungen

Werden von einer Membran Töne verschiedener Frequenzen abgestrahlt macht sich der so genannte Dopplereffekt störend bemerkbar. Schwingt die Membran mit großer Auslenkung bei z.B. 30 Hz und ist gleichzeitig ein 1000 Hz Ton überlagert, dann wandert vom Zuhörer aus gesehen der 1000 Hz Ton 30-mal pro Sekunde hin und her. Beispielsweise klingt das Horn eines sich nähernden Krankenwagen höher und des sich entfernenden tiefer. Beim Lautsprecher entsteht eine Frequenzmodulation vom hohen mit dem tiefen Ton. Somit wird der 1000 Hz Ton als rau klingend wahrgenommen. Abhilfe kann hier durch ein Mehrwegesystem geschaffen werden.

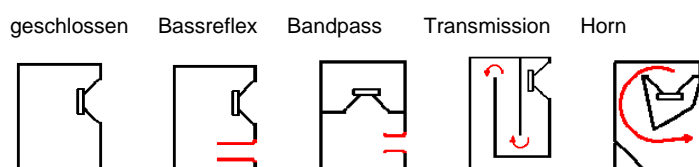
3 Lautsprechergehäuse

Auf Grund der Rahmenbedingungen welche den Umfang dieser Arbeit eingrenzen, wird auf die Funktionsweisen der einzelnen Lautsprechergehäuse nicht hingewiesen. Ausführliche Informationen bieten hierfür die im Anhang aufgelisteten Infoquellen. Wobei der Hornlautsprecher ein interessantes System widerspiegelt, der Wirkungsgrad kann bis zu 10-mal größer werden als ein direkt abstrahlender Lautsprecher... nimmt aber viel Platz ein und ist auch optisch nicht mein Geschmack

3.1 Gehäuse Auswahl

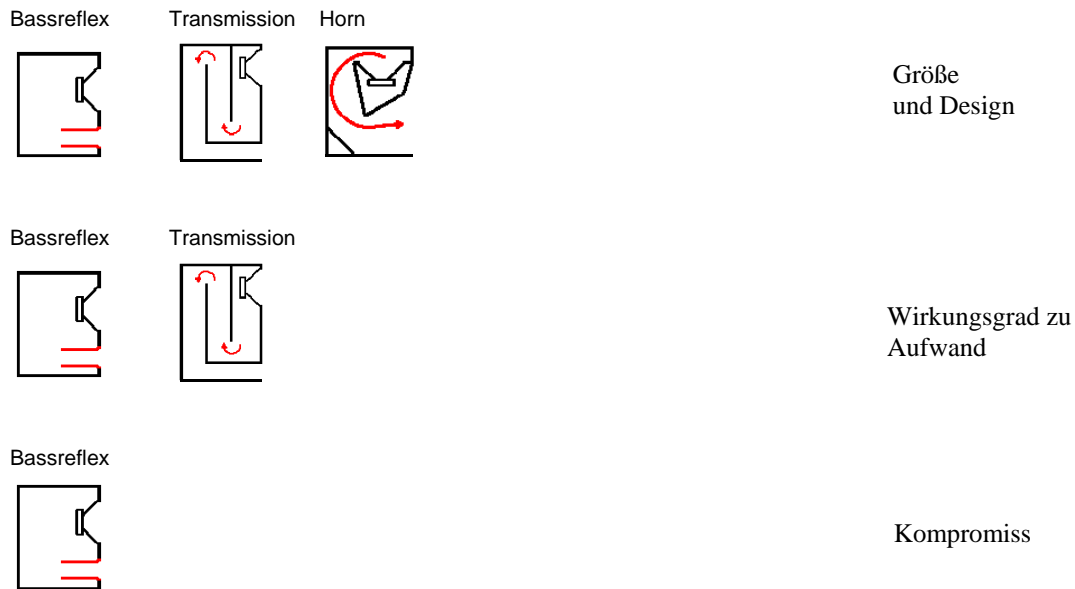
Das Lautsprechergehäuse wird nach folgenden Killer Kriterien ausgewählt.

In Betracht gezogen werden:



Kriterium:

tiefreichende +
breitbandige
Frequenzwiedergabe



3.2 Bassreflexgehäuse

Bei der Bassreflexbox bewegt sich infolge der Membranbewegung die Luft im Rohr hin und her. Wobei hier die Luft über ein elastisches Luftpolster indirekt bewegt wird. Dieses schwingungsfähige System, welches aus einem Volumen und einer Öffnung besteht, wird Helmholtzresonator genannt. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise kann das Bassreflexsystem in drei Frequenzfälle separiert werden.

- Bei schneller Bewegung der Membran verhindert die Federwirkung des Luftpolsters im Gehäuse den Austritt der Luftmasse am Rohr.
- Bei einer bestimmten Frequenz schwingt die Luftmasse im Rohr viel stärker als die der anregenden Membran. Das ist der Resonanzfall. Diese Frequenz wird Tuningfrequenz f_b genannt.
- bei tiefen Frequenzen ca. ab 100 Hz, folgt die Luftmassen im Rohr der Membran.



Abb. 12 Bassreflexsystem im Fall c

Im Fall c ergibt sich eine Phasenverschiebung von 180° , hier strahlen Membran und Öffnung gleichzeitig in Richtung Hörer ab. Während beispielsweise bei einem geschlossenen System die Energie der bewegten Luft in Wärme umgewandelt wird, nutzt das Bassreflexsystem sie für die Schallabstrahlung. Bei hohen Frequenzen (Fall a) besteht eine 0° Phasenverschiebung, allerdings mit sehr viel kleineren Amplituden. Die Luft im Rohr und die der Membran bewegen sich nach innen. Bei der Resonanzfrequenz f_b beträgt der Phasenwinkel 90° . Wenn die Membran nach innen geht, folgt die Luft etwas verzögert nach. Die Resonanzfrequenz einer Bassreflexbox wird dorthin gelegt, wo der Lautsprecher in der geschlossenen Box keinen Schall mehr abstrahlen kann, also tiefer als die Eigenresonanzfrequenz f_c einer geschlossenen Box. In diesem Bereich regt der Lautsprecher das Bassreflexrohr an, und der Frequenzbereich kann deutlich nach unten hin erweitert werden. Im rechten Bild ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad des Bassreflexsystems gegenüber der geschlossenen Box wesentlich bessere Ergebnisse liefert. Möchte man z.B. den Schall um 6 dB mit einem Equalizer anheben, so muss man dem Lautsprecher die 4-fache Leistung zuführen.

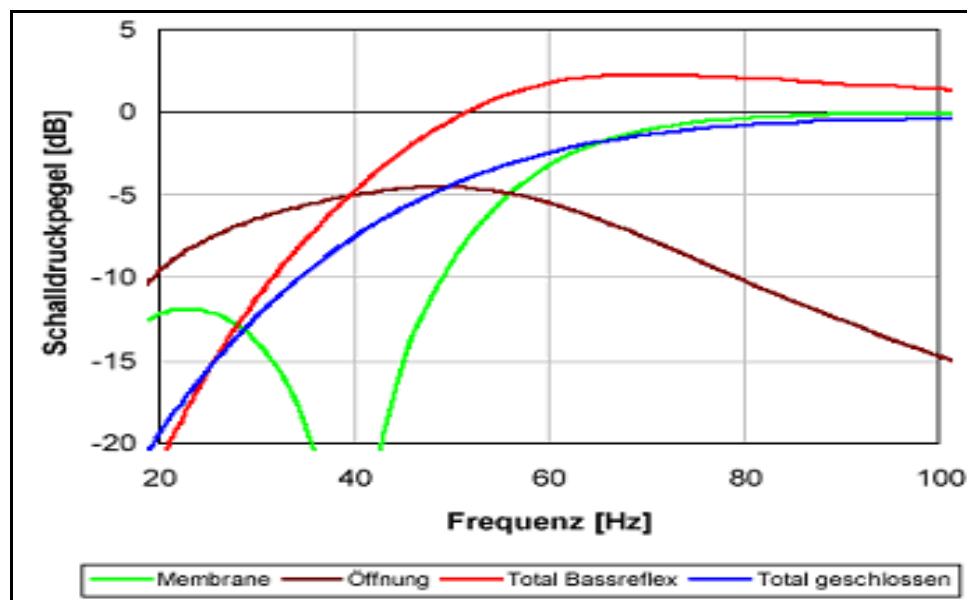


Abb. 13 Impedanzverläufe im Vergleich

3.3 Marktforschung Bassreflexlautsprecher

Aus den gesammelten Erfahrungen der vorangegangenen Kapitel kann die Suche auf folgende Kriterien eingeschränkt werden.

- Bassreflexsystem
 - 3 – Wegesystem (Kapitel 2.5)
 - High End Chassis (Kapitel 1.5 , 2.2)
- ⇒



Abb. 14 VOX253

Die [VOX 253](#) ist eine Standbox, bei der der Tieftöner [TIW 250 XS 8 Ohm](#) in die Seitenwand eingesetzt wird. Dadurch kann die Front sehr schmal und damit wohnraumfreundlich gehalten werden.

Auf dem ersten Blick liefert die Vox von Visaton einen recht zufrieden stellenden Eindruck. Bei einer genaueren Betrachtung fallen allerdings folgende Optimierungsfaktoren auf:

1. Stehende Wellen im Mitteltongehäuse. (Kapitel 1.4)
2. Stehende Wellen in- und außerhalb vom Bassgehäuse. Desweiteren kann ein paralleles Aufstellen des Lautsprechers zwischen Wänden im Raum ebenfalls zu stehenden Wellen führen.
3. Ungleichmäßige Gehäuseverstärkungen
4. Interferenzen im Bass und Mitteltonbereich. (Kapitel 2.3)
5. Das Volumen ist sehr allgemein gehalten und nicht auf die einzelnen Chassis angepasst.
6. Die Frequenzweich ist nicht auf das Klangverhalten der Chassis im Gehäuse Abgestimmt.

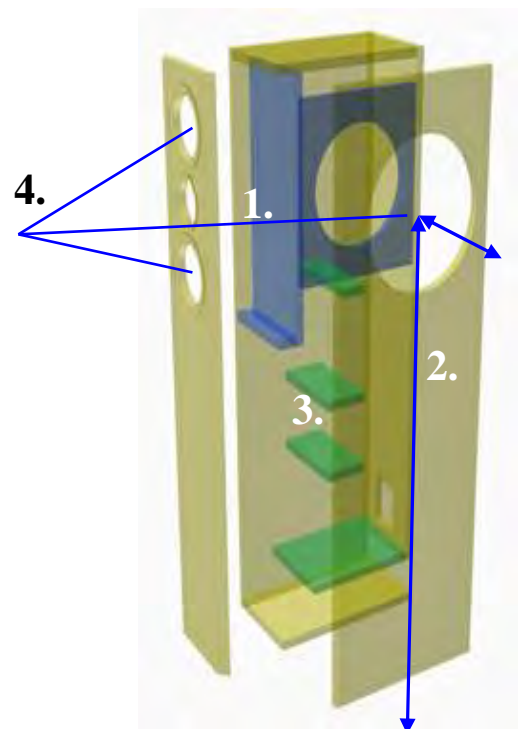


Abb. 15 VOX253 Explosionszeichnung

3.4 Bassreflexabstimmung

Eine gutbewährte Methode zur Berechnung der Bassreflexbox ist die nach Thiele und Small. Als Chassis für den Tieftonbereich soll der TIW200XS von Visaton verwendet werden. Für die Berechnung sind folgende Parameter notwendig:

$R_{DC} =$	Gleichstromwiderstand der Schwingspule =	6 Ohm
$R_L =$	Widerstand der Spule auf der Frequenzweiche =	0,5 Ohm
$f_s =$	Freiluftresonanzfrequenz des Chassis =	29 Hz
$f_B =$	Gehäuseresonanzfrequenz =	? Hz
$Q_{TS} =$	Gütefaktor des nicht eingebauten Chassis =	0,43
$Q_{TS}' =$	Gütefaktor des eingebauten Chassis =	?
$V_{AS} =$	äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen =	66 Liter
$V_B =$	gesuchtes Nettoboxvolumen =	? Liter
$\alpha =$	Verhältnis zwischen V_{AS} und $V_B \Rightarrow$	im Diagramm dargestellt
$h =$	Verhältnis zwischen f_B und $f_s \Rightarrow$	im Diagramm dargestellt

$$Q_{TS}' = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS} = 0,46583 \quad [1]$$

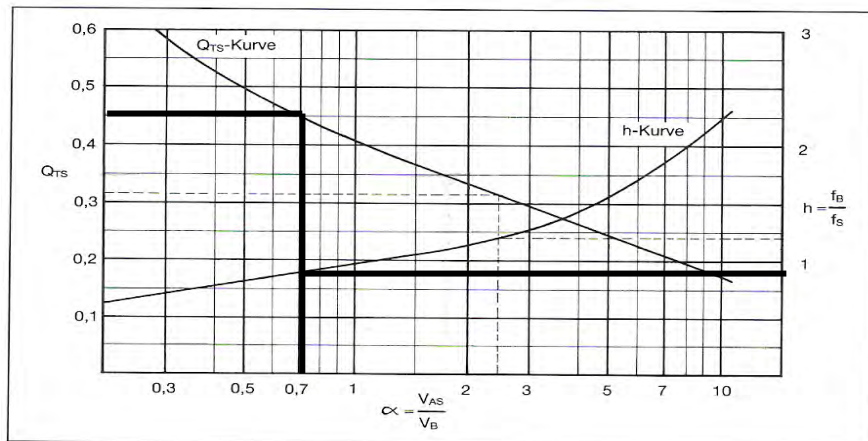


Abb. 16 Bestimmung von α und h

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_B} \Leftrightarrow V_B = \frac{V_{AS}}{\alpha} \quad [2]$$

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\alpha} = \frac{45l}{0,71} = 63,38l \quad [3]$$

$$f_B = h * f_s = 0,98 * 29Hz = 28,42Hz \quad [4]$$

3.5 Hogesches Näherungsverfahren

Bei der Thiele und Small – Abstimmung können nur Lautsprecher mit einem Q_{TC} Wert von 0,6 berechnet werden. Bevor es hier aber weiter geht muss das Vokabular um zwei weitere Größen erweitert werden.

Q_{TC} = Güte- Faktor des eingebauten Chassis (geschlossene Box)

f_c = Resonanzfrequenz des eingebauten Chassis (geschlossene Box)

$$f_c = f_s * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B}} + 1 \quad [5]$$

Für die Eigenresonanzfrequenz f_c im Gehäuse gilt: Je tiefer sie liegt, desto tiefer reicht die Basswiedergabe.

$$Q_{TC} = Q_{TS} * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B}} + 1 \quad [6]$$

Je kleiner der Q_{TC} Wert ist, desto kontinuierlicher ist das Einschwingverhalten der Bässe, allerdings nimmt mit ihm auch die Basslautstärke ab. Bei einem zu hohen Q_{TC} Wert entsteht eine starke ausgeprägte, aber verwaschene Basswiedergabe.

$$\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} = \frac{f_c}{f_s}$$

Werden die Gleichungen [5] und [6] nach V_B aufgelöst und gegenübergestellt, wird ersichtlich dass die Resonanzfrequenz und der Güte- Faktor im direkten Verhältnis zu einander stehen.

Charakteristiken der QTCs laut (www.hifi-forum.de)

- * $Q_{TC} = 0,5$ ist für den Highend Musikhörer mit viel Platz
- * $Q_{TC} = 0,577$ (Bessel-Charakteristik) ideales Phasenverhalten, jedoch noch geringe Bassausbeute
- * $Q_{TC} = 0,7-0,9$ Für die Allroundhörer (bei $Q_{TC} 0,707$ Butterworth) oft als ideal benannt beste Allroundeigenschaften
- * $Q_{TC} > 0,9$ Was für Techno und SPL Freaks , maximale Bassausbeute für geschlossene Gehäuse
- * Q_{TC} 's über 1,1 sind nicht zu empfehlen (kaum Impulstreue)

Zurück zum Hogeneschen Näherungsverfahren:

Als erstes werden die Größen Q_{TC} und f_c der geschlossenen Box berechnet. Die Impedanz-Kurve der geschlossenen Box hat ihr Maximum bei der Resonanzfrequenz f_c . Die Tuningfrequenz f_b liegt ungefähr da wo die Impedanz-Kurve der Bassreflexbox ihr Maximum hat. f_b ist kleiner als f_c und zwar nach Thiele und Small um einen Faktor von ungefähr 0,7. Die Tuningfrequenz einer Bassreflexbox wird dorthin gelegt, wo der Lautsprecher in der geschlossenen Box keinen Schall mehr abstrahlen kann, also tiefer als die Eigenresonanzfrequenz f_c einer geschlossenen Box (siehe Kapitel 3.2 Fall c).

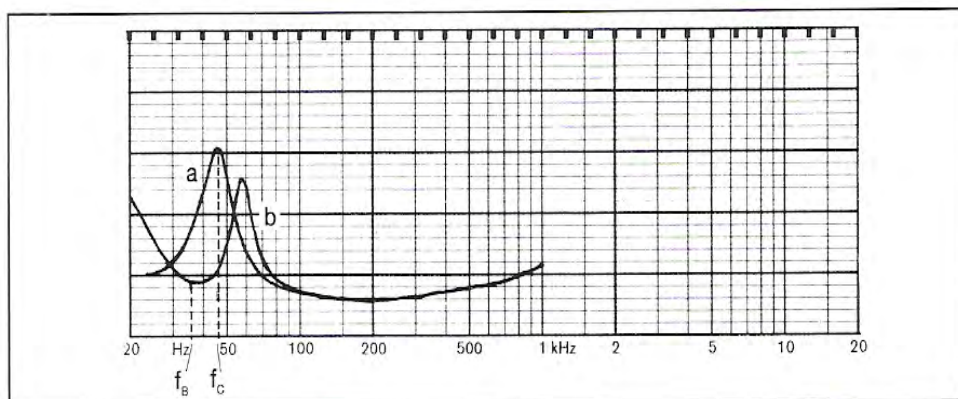


Abb. 17 Vergleich der Frequenzgänge einer geschlossenen und einer Bassreflexbox

a = geschlossen

b = Bassreflex

Rechenweg:

$$Q_{TC} = Q_{TS} * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \Leftrightarrow V_B = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1} \quad [\text{aus 6}]$$

$$f_c = f_s * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \Leftrightarrow V_B = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 - 1} \quad [\text{aus 5}]$$

$$f_B = 0,7 * f_C \quad [7]$$

mit Frequenzweiche: $Q_{TS'} = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS}$ [aus 1]

$$Q_{TC'} = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS} * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B}} + 1 \Leftrightarrow V_B = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC'} * R_{DC}}{(R_{DC} + R_L) * Q_{TS}} \right)^2 - 1} \quad [\text{mit 5 und 1}]$$

⇒

ein gewünschtes Klangergebnis durch einsetzen von $Q_{TC'}$ mit dem Ergebnis V_B .
(siehe Charakteristiken der QTCs)

Zur Übersicht wird der Verlauf von f_c , f_b und V_B durch eine Excel Kalkulation in einem Diagramm über Q_{TC} dargestellt

f_c =	Q_{TC} =	V_B	f_b
36,68242086	0,589237737	75	25,6776946
36,59180955	0,587782228	76	25,61426669
36,50333555	0,586361051	77	25,55233489
36,41692337	0,584972993	78	25,49184636
36,33250105	0,583616899	79	25,43275074
36,25	0,582291667	80	25,375
36,16935474	0,580996244	81	25,31854832
36,09050277	0,579729628	82	25,26335194
36,01338439	0,578490858	83	25,20936907

Tabelle 1 Excel Kalkulation Bassreflex

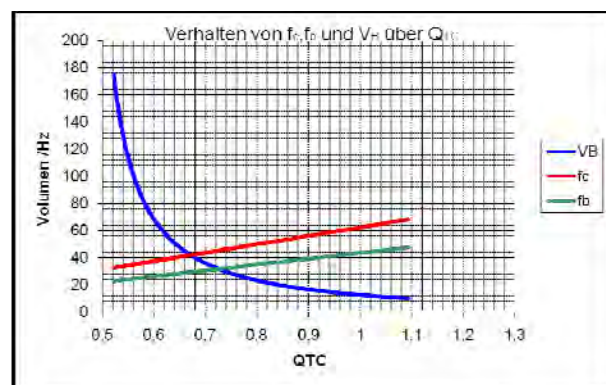


Abb. 18 Frequenz und Volumen über Q_{TC} (Bassreflex)

Wie aus dem Excel-Ausschnitt zu erkennen ist ändert sich der Frequenzgang ab 75 l nicht mehr gravierend. Damit die Dimensionierung des Lautsprechers realisierbar bleibt, wird das Volumen auf 80 l gerechnet. Mit einem Q_{TC} von 0,58 ist der Phasengang nahe zu ideal und die Tuningfrequenz f_b mit 25,3 Hz, wenn man bedenkt, dass der Mensch Frequenzen unter 20 Hz nicht mehr wahrnehmen kann hinreichend tief genug. (siehe Kapitel 1.1)

bestimmen der Tunnellänge vom Resonanzrohr:

C =	Schallgeschwindigkeit der Luft =	343m/s
F =	Querschnittsfläche der der Tunnelöffnung =	cm ²
d =	Durchmesser von der Tunnelöffnung =	7,1cm
f _B =	Tuningfrequenz =	? Hz
V _B =	Nettovolumen der Box =	80 Liter
l =	Länge des Tunnels =	?cm

Rechenweg:

$$f_B = 0,7 * f_C \quad [7]$$

$$l = \frac{10 * c^2 * F}{4 * \pi^2 * f_B^2 * V_B} - 0,5 * \sqrt{\pi * F} \quad [8]$$

$$l = \frac{10 * c^2 * d^2}{16 * \pi * (0,7 * f_C)^2 * V_B} - 0,5 * \sqrt{\frac{d^2 * \pi^2}{4}} = 17cm \quad [\text{mit 7 und 8}]$$

4 Der Mittel.- und Hochtonbereich

4.1 Akustische Aufhängung

Der Tieftonlautsprecher arbeitet mit großen Ausschlägen und relativ langsamen Bewegungen, z.B. 25 Hz = 25-mal pro Sekunde, um dieses zu realisieren benötigt er ein großes weiches Luftpolster. Hingegen wird im Mittel.- und Hochtonbereich mit schnellen und kleinen Bewegungen gearbeitet z.B. 5000 Hz = 5000-mal pro Sekunde. Damit ein ungestörtes arbeiten zwischen Mittel.-und Tieftonchassis gewährleistet ist, wird für den Mitteltöner ein geschlossenes System ins Bassreflexgehäuse integriert. Ein geschlossenes Luftvolumen hat eine Federwirkung (je kleiner das Volumen, desto härter ist die Feder). Es wirkt also ein Luftpolster, das die Aufhängung des Chassis härter macht und somit die kleinen schnellen Bewegungen der hohen Frequenzen über die rücktreibende Kraft unterstützt.

4.2 Parallelschaltung von Chassis

Für einen besseren Wirkungsgrad des Schallpegels im Mitteltonbereich werden zwei parallel geschaltete Chassis AL130 von Visaton verwendet. Daraus folgt ein Schallpegelgewinn von 3 db bei gleichbleibender Leistung.

Beispiel:

Angenommen man hat einen 8 Ohm Lautsprecher der bei 1 Watt elektrischer Leistung in 1 m Abstand 90 db Schalldruck erzeugt. (Erhöht man die Leistung auf 2 Watt, so bekommt man 93 db. Bei zwei 8 Ohm Lautsprechern nehmen beide je 1 Watt elektrische Leistung auf, was zu einer Schalldruckerhöhung um 3 db auf 93 db führt. Da jetzt aber die doppelte Membranfläche vorhanden ist, kommen durch die Erhöhung des Strahlungswiderstandes noch einmal 3 db hinzu.

4.3 Berechnung vom geschlossenem Gehäuse

Für die Gehäuse Berechnung der Mitteltöner wird auch das Hogeschen Näherungsverfahren angewendet. Nur muss jetzt, da zwei Chassis parallel eingesetzt sind, für $V_{AS} = 2\text{-mal } V_{AS}$ eingesetzt werden.

Technische Daten AL130 von Visaton:

$R_{DC} =$	Gleichstromwiderstand der Schwingspule =	5,6 Ohm
$R_L =$	Widerstand der Spule auf der Frequenzweiche =	0,5 Ohm
$f_s =$	Freiluftresonanzfrequenz des Chassis =	43 Hz
$Q_{TS} =$	Gütefaktor des nicht eingebauten Chassis =	0,38
$Q_{TS}' =$	Gütefaktor des eingebauten Chassis =	?
$V_{AS} =$	äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen =	13 Liter
$V_B =$	gesuchtes Nettoboxvolumen =	? Liter

Rechenweg:

$$f_C = f_S * \sqrt{\frac{2 * V_{AS}}{V_B} + 1} \Leftrightarrow V_B = \frac{2 * V_{AS}}{\left(\frac{f_C}{f_S}\right)^2 - 1} \quad [\text{aus 5}]$$

$$Q_{TC} = Q_{TS} * \sqrt{\frac{2 * V_{AS}}{V_B} + 1} \Leftrightarrow V_B = \frac{2 * V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1} \quad [\text{aus 6}]$$

mit Frequenzweiche:

$$Q_{TC'} = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS} * \sqrt{\frac{2 * V_{AS}}{V_B} + 1} \Leftrightarrow V_B = \frac{2 * V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC'} * R_{DC}}{(R_{DC} + R_L) * Q_{TS}} \right)^2 - 1} \text{ [mit 5 und 1]}$$

⇒

ein gewünschtes Klangergebnis durch einsetzen in Q_{TC} mit dem Ergebnis V_B .

Zur Übersicht wird hier auch der Verlauf von f_c und V_B durch eine Excel Kalkulation in einem Diagramm über Q_{TC} Dargestellt:

QTC	VB	fc
0,68147859	7,6	70,7938073
0,67868026	7,7	70,5031085
0,67594253	7,8	70,218706
0,67326339	7,9	69,9403905
0,67064093	8	69,6679625
0,66807331	8,1	69,401231
0,66555877	8,2	69,1400135
0,66309562	8,3	68,8841353
0,66068226	8,4	68,6334293

Tabelle 2 Excel Kalkulation geschlossen

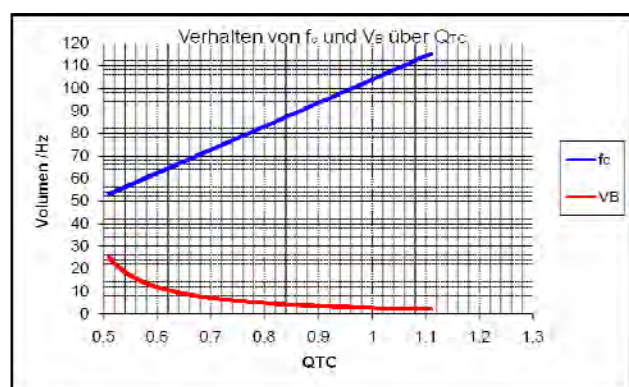


Abb. 19 Frequenz und Volumen über Q_{TC} (geschlossen)

Der Tieftonbereich des Basschassis wird über eine Frequenzweiche ab 100 Hz getrennt. (siehe im Anhang: Frequenzgang der gesamten Box). Damit eine saubere Übernahmefrequenz vom Tief- zum Mitteltöner möglich ist, muss der Mitteltöner etwas unter der 100Hz Grenze arbeiten können. Hier ist der AL130 sehr gut geeignet, da er auch bei tiefen Frequenzen noch hervorragende Ergebnisse erzielt. Als Ergebnis wird ein Volumen von 8 Litern gewählt wobei ein Q_{TC} Wert von 0,67 resultiert. (siehe Kapitel 3.5 Charakteristiken der Q_{TC} s).

4.4 Hochtongbereich

Als Hochtöner wird der DSM25 von Visaton verwendet. Der DSM25 ist ein Kalottenlautsprecher und kann problemlos mit ins Mitteltongehäuse integriert werden. Der Kalottenlautsprecher unterscheidet sich vom Konuslautsprecher (TIW200XS und AL130) hauptsächlich dadurch, dass die Konusmembran und die Sicke weggelassen werden und der Schall nur von der Staubkalotte abgestrahlt wird. Aus diesem Grund ist auch kein extra Gehäuse notwendig.

5 Gehäuse Konstruktion

Aus den vorangegangenen Kapiteln resultieren nun angesammelte Erkenntnisse, welche theoretisch zu genau einer Gehäuseform führen. Jetzt muss das Gehäuse nur noch konstruiert werden. Zum Überblick werden alle Punkte in der zu konstruierenden Reihenfolge aufgelistet.

- als Vorbild steht die Vox 253 (Bassreflexsystem)
 - ⇒ stehende Wellen in.- und außerhalb des Gehäuses
 - ⇒ Interferenzen zwischen Tief.- und Mitteltöner
 - ⇒ Eigenresonanzen und Schwingungen vom Gehäuse reduzieren
- Klangeigenschaften des Lautsprechers
 - ⇒ Volumenberechnung für Bassreflexgehäuse
 - ⇒ Volumenberechnung für Mitteltongehäuse
- Design

Punkt eins

Wenn es keine parallelen Wände gibt, kann es auch keine stehenden Wellen geben.

⇒ Grundform

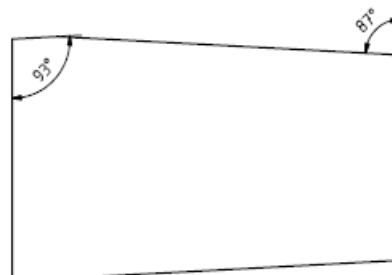


Abb. 20 Grundkörper

Wird der Tieftöner weiter nach unten verlagert, können auf der Bezugsebene keine Interferenzen mehr auftreten.

⇒ neu Position
für Tieftöner



Abb. 21 Chassis Anordnung

Für die Eigenresonanzbestimmung wird eine 1 Meter mal 0,4 Meter Holzplatte in Abhängigkeit der Lagerung (am Rand und in den Versteifungen) in Ansys (FEM Programm) untersucht.

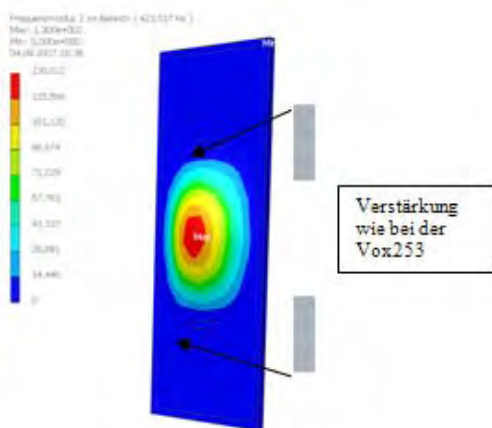


Abb. 23 1 Eigenresonanz der VOX253

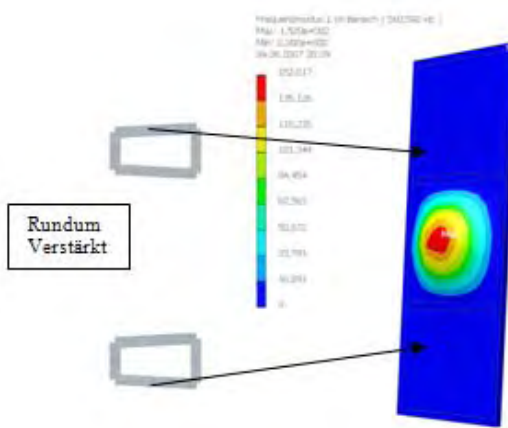


Abb. 22 1 Eigenresonanz nach der Optimierung

Durch die Rundumverstärkung ist die 1 Eigenresonanzfrequenz von 423 Hz auf 560 Hz gestiegen. Hier besteht keine Gefahr, dass die Eigenresonanz der Holzwand getroffen wird. Da die Erregerfrequenz des Tieftöners bei 100 Hz endet.

Zur Schwingungsminimierung wurde ein Druck auf die Innenfläche ausgeübt und die Deformation über eine Lagerungsoptimierung minimiert

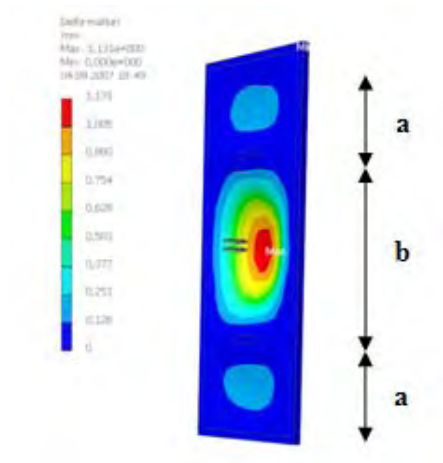


Abb. 25 ungleichmäßige Lagerung

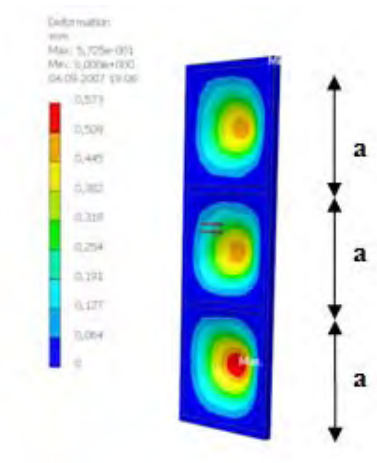


Abb. 24 gleichmäßig verteilte Lagerung

Durch die Rundumverstärkung und das Vermitteln der Abstände wird das Schwingverhalten der Holzplatte um 50 % reduziert.

Punkt zwei:

Das Volumen soll wie in Kapitel 3.5 berechnet, 80 Liter betragen. Mit guter Näherung setzt sich das Volumen aus zwei gleichschenkligen Trapezen und der Höhe des Innenraums zusammen. Zu beachten ist aber noch, dass das Volumen des innenliegenden geschlossenen Gehäuses abgezogen werden muss. Also muss zuerst die Dimensionierung des geschlossenen Gehäuses bestimmt werden.

Das geschlossene Gehäuse wird direkt auf die Rückseite der Front befestigt.

Damit keine stehenden Wellen entstehen, wird ein halbes Zwölfeck (Ideal wäre ein halber Zylinder aber schwer zu realisieren) verwendet. Unter Beachtung der kleinen Fläche $a \cdot b$ welche durch spätere Holzstreben entsteht, an die das Gehäuse gesetzt werden soll, ergibt sich folgende Formel für das Volumen:

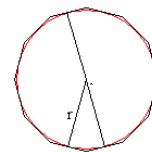
$$V_1 = \left(\frac{6 * r_{\text{geschlossen}}^2}{2 + \sqrt{3}} + a_{\text{geschlossen}} * b_{\text{geschlossen}} \right) * h_{\text{geschlossen}} \quad [9]$$

$$\Rightarrow V_1 = 7,54l$$



Abb. 26 geschlossenes Gehäuse

Aus optischen Gründen soll die Front des Lautsprechers ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Daraus folgt: Der maximale Durchmesser für das geschlossene Gehäuse. Somit ist die Höhe h die einzige Variable und wird über eine Excel Kalkulation dem Volumen von 8 Litern angenähert.



Für die Breite b_{st} der 6 Streben ergibt sich für den späteren Zuschnitt folgende Formel:

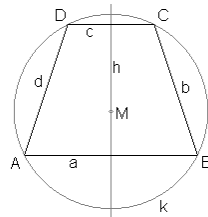
$$b_{st} = \frac{2 * r_{\text{geschlossen}}}{2 * \sqrt{3}} \quad [10]$$

und für den Winkel der Streben zu einander 150 Grad.
(Einzelteilzeichnungen liegen in digitaler Form vor)

Die hier verwendeten Formeln für die zu berechnenden Volumina bzw. Flächen und Längen, können aus einfachen mathematischen Formelsammlungen oder dem Internet bezogen werden.

Zurück zum Bassreflexgehäuse

Aus optischen Gründen soll hier auch das Gehäuse eine bestimmte Breite und Tiefe nicht überschreiten, es ergibt sich ein Flankenwinkel von 3 Grad. Jetzt wo die Breiten und Tiefen a , c und h der beiden Trapeze fix sind, bleibt als einzige Variable wieder die Höhe $h_{\text{Bassreflex}}$ und kann über eine Excel Kalkulation dem Volumen von 80 Litern angenähert werden.

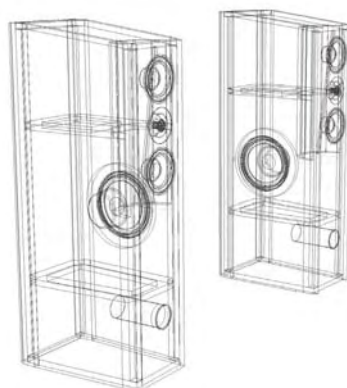


Das Volumen des Bassreflexgehäuses lässt sich somit aus folgender Formel berechnen. (Achtung für Bassgehäuse Innen.- und beim geschlossenen Außenmaße einsetzen)

$$V_3 = V_2 - V_1$$

$$\Rightarrow V_3 = \left[\left(\frac{a_{\text{Trapez 1}} + c_{\text{Trapez 1}}}{2} * h_{\text{Trapez 1}} + \frac{a_{\text{Trapez 2}} + c_{\text{Trapez 2}}}{2} * h_{\text{Trapez 2}} \right) * h_{\text{Bassreflex}} \right]$$

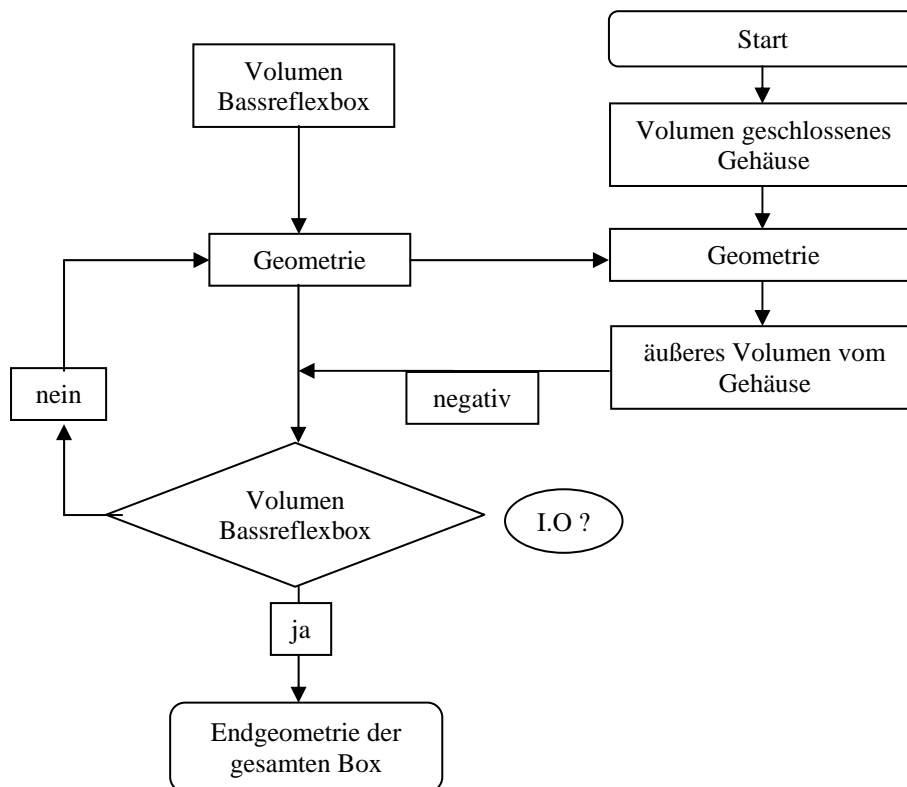
$$- \left(\frac{6 * r_{\text{ageschlossen}}^2}{2 + \sqrt{3}} + a_{\text{ageschlossen}} * b_{\text{ageschlossen}} \right) * h_{\text{geschlossene}} \quad [11]$$



$$V_3 = 81,55l$$

Abb. 27 Bassreflexvolumen

schematischer Konstruktionsablauf:



Nachdem die Dimensionen und Formen stehen, müssen nur noch die Verbindungen der Wände und die Befestigungen der einzelnen Chassis durchdacht werden.

Mein Vorschlag wäre:

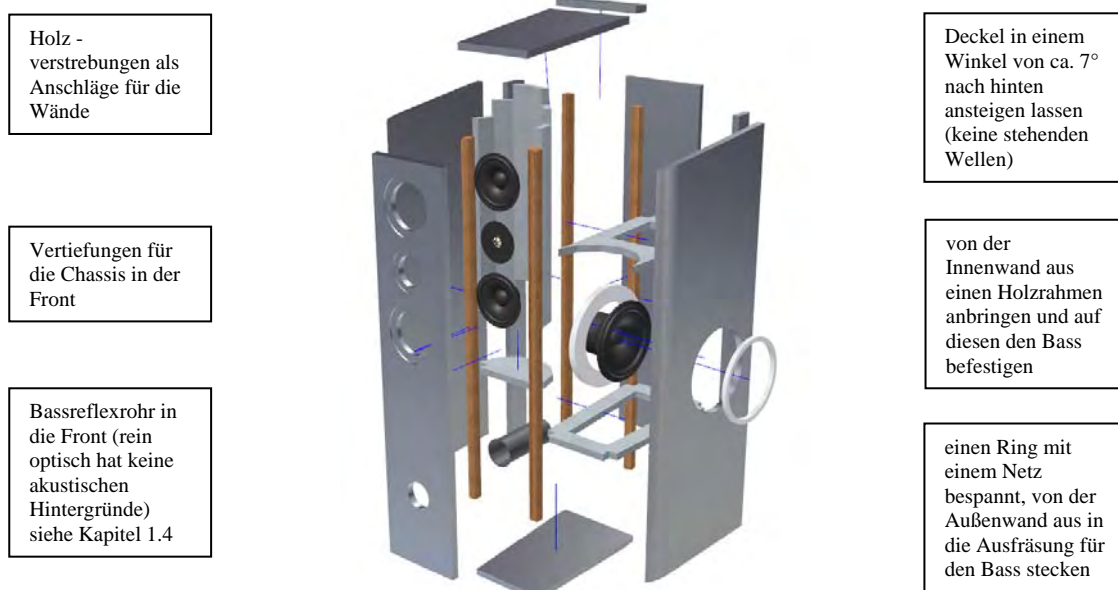


Abb. 28 Explosionszeichnung

6. Gehäuse Dämpfung

Der Lautsprecher sollte locker mit Dämpfungsmaterial, am wirkungsvollsten in der Mitte, ausgefüllt werden was hauptsächlich zur Unterdrückung von stehenden Wellen notwendig ist. Dank der Gehäusekonstruktion sind diese aber bei diesem Lautsprecher nicht möglich. Das Dämpfungsmaterial kann aber auch für eine leichte Bassabstimmung verwendet werden. Ist Beispielsweise zu viel Dämmaterial vorhanden mangelt es an Tief bass. Empfehlenswert ist jedoch die Wände mit sogenannten Piatexplatten zu bekleben. Diese reduzieren das Schwingverhalten der Außenwände erheblich.

7. Frequenzweiche

Die Frequenzweiche ist ein wichtiges Element des Lautsprechers. Sie hat die Aufgabe, die Tonfrequenzen in verschiedene Bereiche aufzuteilen. Jedes Chassis bekommt dann einen Frequenzbereich zugeteilt, in dem es optimal arbeitet. Eine Frequenzweiche (passiv) besteht aus Spulen, Kondensatoren und Widerständen. Generell kann man sagen, dass ein Tonfrequenzsignal durch diese Bauteile manipuliert und im günstigsten Fall nicht hörbar verschlechtert wird. Für das Berechnen und Bauen einer Frequenzweiche wird für dieses Projekt professionelle Hilfe herbei gezogen (meine Empfehlungen: Herr Kahle aus dem Studio 45 in Bremen). Im HIFI Studio wird das tatsächliche Verhalten der einzelnen Chassis im Gehäuse gemessen und darauf hin die Frequenzweiche angepasst. Für die Selbstentwicklung der Frequenzweiche bietet sich zur Erprobung hervorragend die Simulation Software BOXIM von Visaton an. Mit dieser Software lassen sich unter anderem Frequenzgänge von Chassis im Gehäuse in Abhängigkeit von einer selbst zusammengestellten Frequenzweiche simulieren. (siehe Deckblatt)



Abb. 29 eingebaute Frequenzweiche

8. Zusammenfassung

Von der Akustik zum Lautsprecher:

1. physikalische Grundlagen der Akustik
2. Wahl des Lautsprechersystems
3. Marktrecherchen über vorhandenen Lautsprechersysteme
4. Wahl der Chassis (meine Empfehlung geht an Visaton)
5. Kostenabschätzung
6. Volumenberechnung, welche das Klangverhalten des Lautsprechers bestimmt. (siehe Kapitel 3.5: Charakteristiken der QTCs)

Beispiel: Bassreflex – System

- a) durch Einsetzen von QTC und den Kenndaten des Chassis in folgender Formel ergibt sich das Volumen der geschlossenen Box:

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC} * R_{DC}}{(R_{DC} + R_L) * Q_{TS}} \right)^2 - 1} \quad [\text{mit 5 und 1}]$$

- b) mit V_B kann die Resonanzfrequenz f_C der geschlossenen Box wie folgt berechnet werden :

$$f_C = f_S * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \quad [\text{mit 5}]$$

- c) aus f_C ergibt sich dann die Tuningfrequenz f_B der Bassreflexbox mit:

$$f_B = 0,7 * f_C \quad [\text{mit 7}]$$

- d) für das Resonanzrohr ergibt sich nun mit c = Schallgeschwindigkeit der Luft und d = Durchmesser des Rohres die Tunnellänge l :

$$l = \frac{10 * c^2 * d^2}{16 * \pi * f_B^2 * V_B} - 0,5 * \sqrt{\frac{d^2 * \pi^2}{4}} \quad [\text{mit 8}]$$

7. Konstruktion des Gehäuses

- a) das Arbeiten mit CAD –Software ist hier sehr vorteilhaft
- b) werden die Volumina der Gehäuse als Formeln mit Variablen beschrieben und in Excel aufgestellt, dann sind Konstruktionsänderungen der Breiten, Längen und Höhen durch Neueingabe der Variablen schnell und einfach durchzuführen.

Grund: Nach der Volumenberechnung stehen das anzustrebende Volumen der geschlossenen Box VB1 und der Bassreflex Box VB2 fest. Jetzt muss die geschlossene Box noch in die Bassreflex Box integriert werden. Die auftretenden Probleme dabei sind: Wandstärken, Verstärkungen und die unterschiedlichen geometrischen Gehäuse, welche passend zueinander ein Ganzes bilden müssen.

Beispiel:

$$V_{B2} = V_{\text{Bassreflex.Box_Innenmaße}} - V_{\text{geschlossene.Box_Außenmaße}}$$

$$V_{B1} = V_{\text{geschlossene.Box_Innenmaße}}$$

Ergebnisse mit den gewünschten QTCs vergleichen und gegebenenfalls anpassen:

$$Q_{TC'} = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS} * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B}} + 1$$

Die durchgeführten Rechnungen werden in Excel dieser Arbeit in digitaler Form beigefügt.

8. Berechnung der Frequenzweiche

Die Berechnung der Frequenzweiche mit dem Lautsprechersimulationsprogramm Boxim von Visaton ist eine sehr gute Hilfestellung. Die durchgeführten Berechnungen mit Boxim und die Bedienungsanleitung des Programms werden dieser Arbeit in digitaler Form beigefügt. Mein Tipp an den High End Liebhaber ist dennoch: Das tatsächliche Verhalten der Chassis im Gehäuse vom Tonstudio messen und dort die Frequenzweiche anfertigen lassen.

Meine Empfehlung geht an das (Studio 45 in Bremen)

Schlusswort

In diesem Projekt werden die grundlegenden Merkmale der Lautsprecherentwicklung und dessen damit zusammenhängende Akustik aufgezählt und erklärt. Das Ziel, eine durch den Selbstbau vergleichbare Industriebox im PreisLeistungsverhältnis zu schlagen, wurde weitgehend übertroffen. Laut Studio 45 gehört dieser Lautsprecher in eine Preisklasse von 2700€/Stück, wobei 1500€ für beide investiert wurden. Die fantastisch klare Dynamik, der überragende Wirkungsgrad (siehe Anhang) die elegante Optik mit der vom Mercedes SL [Alabasterweiß lackierten Oberfläche](#) und der trockene Tiefbass, ist für mich aber schon Belohnung genug für die Arbeit die in diesem Lautsprecher stecken.



Abb. 30 CAD Zeichnung

9. Literaturverzeichnis

- (1) KLANG +TON - Lautsprecher-Selbstbau-Magazin für HiFi
Michael E. Brieden Verlag GmbH
- (2) Hobby HIFI Zeitschrift für den Lautsprecherselbstbau
Timmermanns Verlag GmbH
- (3) Klinger: Lautsprecher und Lautsprechergehäuse für Hifi
Franzis-Verlag, München / 12. Auflage
- (4) Friedman Hausdorf: Handbuch der Lautsprechertechnik
Visaton GmbH & Co. KG Haan / 7. Auflage
- (5) Lautsprecher und deren Eigenschaften
Projektarbeit von: Panagiotis Gedeon

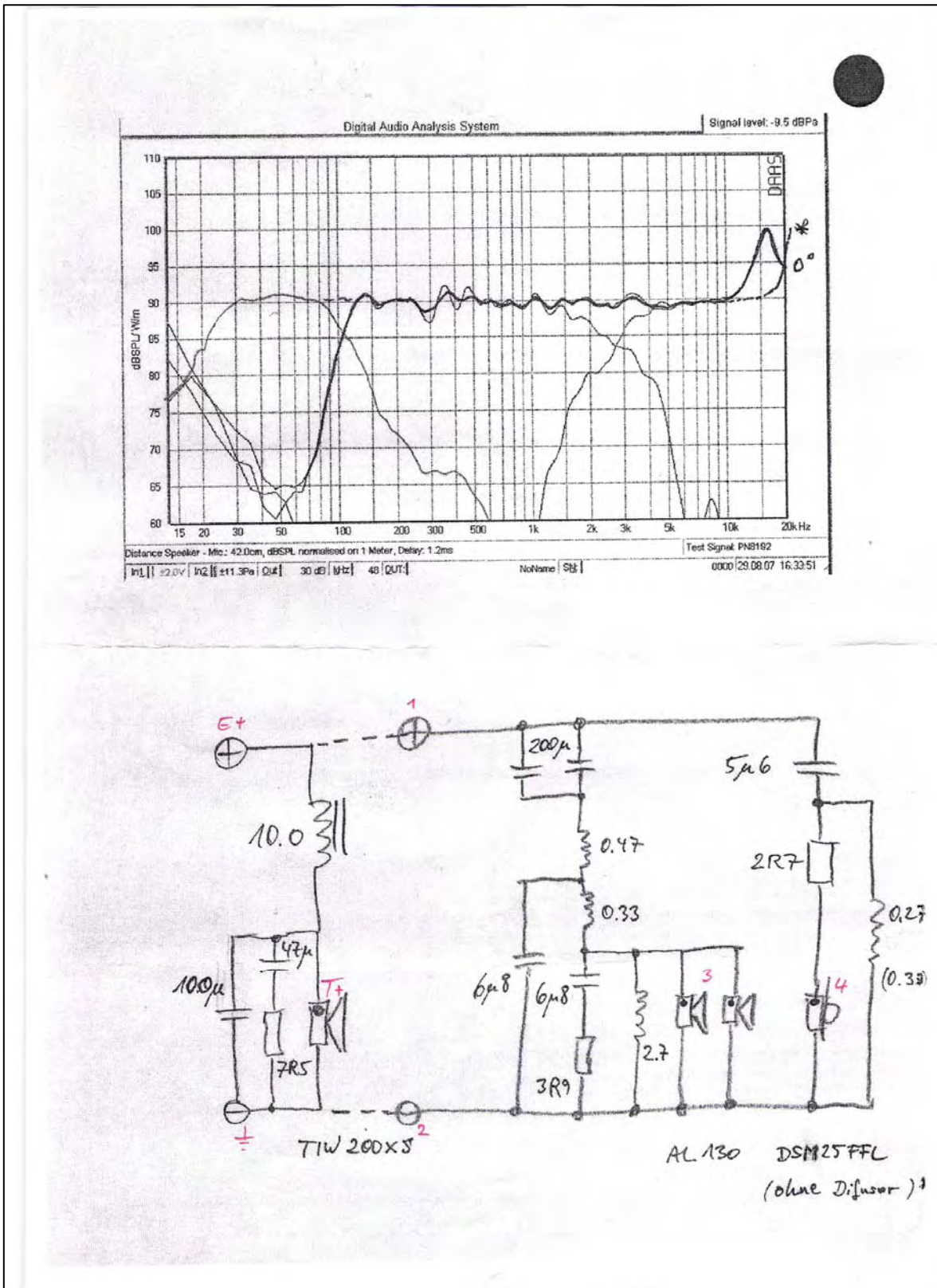
10. Webverzeichnis

- (1) <http://www.visaton.de>
- (2) <http://www.visaton.de/vb>
- (3) <http://www.hunecke.de>
- (4) <http://www.lautsprecherbau.ch>
- (5) <http://vento.pi.tu-berlin.de/STROEMUNGS AKUSTIK>
- (6) <http://weha.wesselnet.de>
- (7) <http://www.hifi-selbstbau.de>
- (8) <http://www.studio45.de>
- (9) <http://www.kettering.edu/%7Edrussell/demos.html>
- (10) <http://edoc.hu-berlin.de>
- (11) <http://www.high-end-corner.de>

11. Anhang

11.1 CAD Daten	[in digitaler Form]
11.2 Zeichnungssatz	[in digitaler Form]
11.3 Berechnungen in Excel	[in digitaler Form]
11.4 FEM Analysen	[in digitaler Form]
11.5 Berechnungen in Boxim + Beschreibung	[in digitaler Form]
11.6 Bildergalerie der praktischen Fertigung	[in digitaler Form]
11.7 Dokumentation	[in digitaler Form]

11.8 Frequenzgang mit Weichenschaltbild



11.9 Kostenaufstellung

Stück	Bezeichnung	€/Stk.	Gesamtkosten
5	MDF Platten	9,45 €	47,25 €
2	Grundierung + Lack	140,00 €	280,00 €
2	TIW 200 XS High-End-Tieftöner	115,00 €	230,00 €
4	AL 130 M	84,00 €	336,00 €
2	Frequenzweiche	190,00 €	380,00 €
2	Zubehör	60,00 €	120,00 €
1	Holzzuschnitt Tischlerei	100,00 €	100,00 €
1	Arbeitsmaterialien	50,00 €	50,00 €

Summe: 1.543,25 €

Tabelle 3 Kostenaufstellung

Nr.	Vorgangname	01 März KW 9	01 April KW 11	01 April KW 13	01 April KW 15	01 Mai KW 17	01 Mai KW 19	01 Juni KW 21	01 Juni KW 23	01 Juli KW 25	01 Juli KW 27	01 August KW 29	01 August KW 31	01 September KW 33	01 September KW 35	01 September KW 37	01 Oktober KW 39	01 Oktober KW 41
1	Von der Akustik zum Lautsprecher																	
2																		
3	Informationen beschaffen																	
4	Internet Recherche																	
5	Literatur beschaffen																	
6	Marktforschung Lautsprecher																	
7																		
8																		
9	Informationen studieren																	
10	Marktforschung Lautsprecher																	
11	Kontaktaufnahme verschiedener Hersteller																	
12	Beratung durch Studio 45																	
13	Kostenanalyse																	
14	Lautsprecher Typ festlegen																	
15	Berechnungen von Dimensionen und Design																	
16	CAD Konstruktion /Zeichnungssätze																	
17	Beratung durch Studio45																	
18	Berechnungen von Dimensionen und Design																	
19	CAD Konstruktion /Zeichnungssätze																	
20																		
21																		
22	Informationen verarbeiten																	
23	Materialzuschnitt nach Zeichnung																	
24	Montagematerialien beschaffen																	
25	Zusammenbau Lautsprechergehäuse																	
26	Oberflächenbearbeitung																	
27	Verkleidung Lautsprechergehäuse																	
28	Chassis bestellen																	
29	Einbau Chassis																	
30	Frequenzweichen im Studio45 abstimmen/montieren																	
31	Klangtest im Studio45																	
32	eventuelle Abstimmung im Studio45																	
33	Toleranz																	
34	Präsentation der Lautsprecher																	
35																		
36																		
37	Nebenjob																	

4 Projekt Lautsprecher
 Datum: Die 11.09.07

Vorgang: Meilenstein: Unterbrechung: In Arbeit:

Externe Vorgänge: Externer Meilenstein: Stichtag:

Meilenstein: Sammelvorgang: Projektsammelvorgang:

Spielraum: Prof. Dr. phil. Horst Crome: Qualitätskontrolle:

11.11 praktischer Nachweis



nur Bretter und CAD



CNC Fräsmaschine



Gehäuseverstärkung



erster Zusammenbau



verleimen



unter Spannung trocknen



Fugen fräsen



Fugen spachteln



2 Wochen schleifen später



erstes mal Grundierung



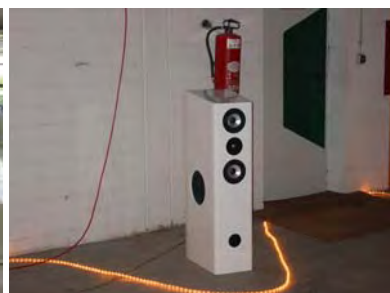
dritte Grundierung und 3 Wochen schleifen später



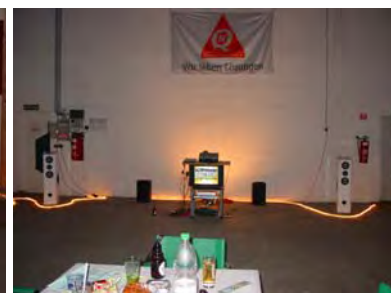
Innenleben verlöten und einbauen



eine Klasse für sich



Weiß ist das Silber der Zukunft



Präsentation



... berechnet, konstruiert und gebaut.

