

Universität für Musik und darstellende Kunst, Wien
Institut für Elektroakustik
Jürg Jecklin
Tontechnik special

5. Lautsprecherwiedergabe in Räumen

Inhalt

1. Der Lautsprecher als Schallquelle
2. Die akustischen Eigenheiten des Wiedergaberaumes
3. Uebliche Anordnungen von Lautsprechern
4. Raum und Lautsprecher als akustische Einheit

1. Der Lautsprecher im Raum

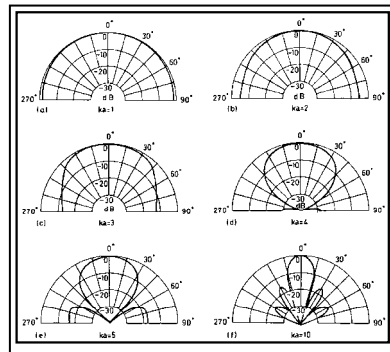
1.1 Schallquelleneigenschaften der Lautsprecher

Monopol

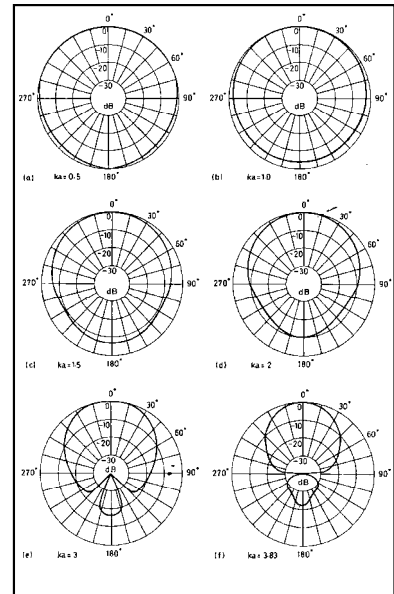
Konventionelle Lautsprecherboxen werden in der Regel als Zwei- oder Dreiwegsysteme realisiert. Der Tieftonbereich wird von einem Tieftonchassis mit einem Durchmesser von 13 cm und 28 cm ungerichtet (kugelförmig) abgestrahlt. Das Lautsprechergehäuse dient dabei als Schallführung (geschlossene Box, Bassreflexgehäuse,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

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

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



vor einer Wand aufgestellter Monopol



freistehender Monopol

Dipol

1. Version

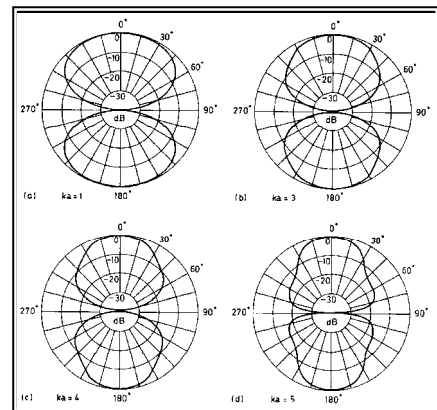
Grossflächige Membransysteme (Elektrostaten oder Magnetostaten) ohne zusätzliche Schallführung.

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

2. Version

Der Dipolstrahler mit konventionellen, in Schallführungen eingebauten Chassis:

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



Bipol

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

Die Richtcharakteristik ist kugelförmig.

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

1.2 Tieftonwiedergabe im Raum

1.2.1 Abstrahlfläche und Strahlungswiderstand

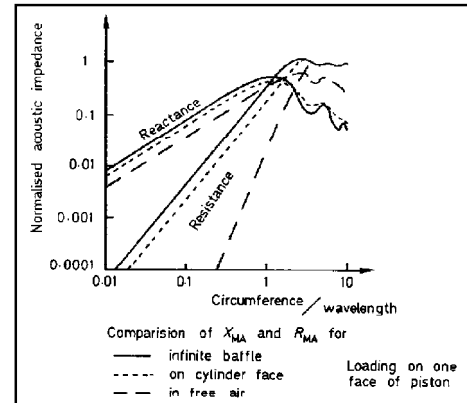
Bei den folgenden Ausführungen wird vorausgesetzt, dass die Gesetzmässigkeiten der Schallabstrahlung durch einen Lautsprecher, sowie die Arbeitsweise der Schallführungen bekannt sind (siehe Theorie der Tontechnik, Kapitel 5)

Die X-Achse zeigt die sogenannte *normierte Frequenz*. Bezugspunkt ist das Verhältnis von Umfang des Lautsprecherchassis zur Wellenlänge des abgestrahlten Tones.

Bei den üblichen dynamischen Lautsprechern mit einem Durchmesser von maximal 38 cm findet die Abstrahlung des Tieftonbereichs im Bereich der nach unten abfallenden Kurve für den Strahlungswiderstand statt.

Die Folge:

- der Wirkungsgrad wird mit abnehmender Frequenz immer kleiner
- Um einen akustischen Kurzschluss zu verhindern, muss das Chassis in einer Schallführung eingebaut sein, die die Vorder- und Rückseite des Chassis akustisch trennt.



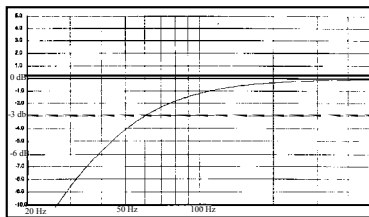
1.2.2 Einfluss der Schallführungen

Im Bereich der Eigenfrequenz eines Lautsprechers und im Frequenzbereich unterhalb der Eigenfrequenz wird der Frequenzgang und die abstrahlbare Leistung von der jeweiligen Schallführung bestimmt. Dies betrifft den vom Q-Wert einer Box bestimmten Frequenzgang bei der Resonanzfrequenz und den Abfall unterhalb der Resonanzfrequenz.

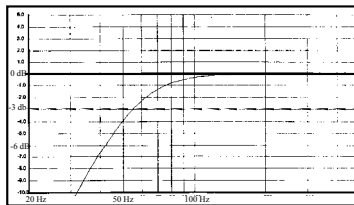
Abfall bei einer geschlossenen Box: 12 dB/Oktav.

Abfall bei einer Bassreflexbox: 24 dB/Oktav.

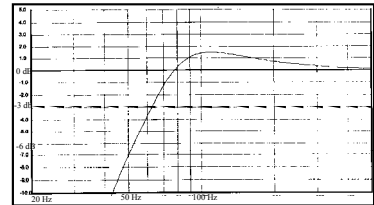
Q-Wert und Frequenzgang einer geschlossenen Box



$F_c = 39 \text{ Hz}$, $Q_{tc} = 0.5$,

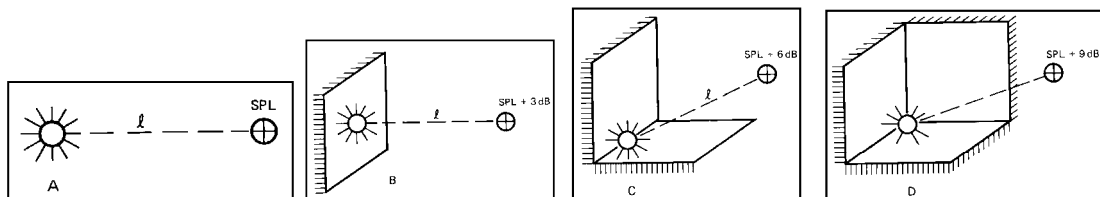


$F_c = 55 \text{ Hz}$, $Q_{tc} = 0.707$,



$F_c = 81 \text{ Hz}$, $Q_{tc} = 1.05$,

1.2.3 Positionierung im Raum und Tieftonwiedergabe



1.3 Akustische Eigenheiten des Wiedergaberaumes

Die raumakustischen Bereiche

akustische Grösse des Raumes

$$f_u = 2000 \cdot \sqrt{RT/V},$$

$$\sqrt{V}^2 = 2000 \cdot RT^2/f_u$$

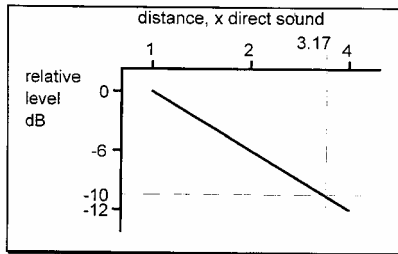
Nachhallzeit

Formel von Sabine
 $RT_{sab} = (0.163 \cdot V) / A_{tot}$

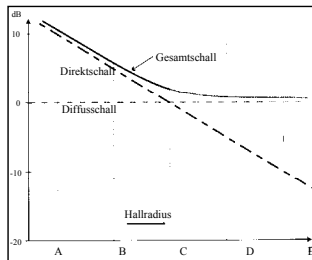
Hallradius

Mit Hallradius bezeichnet man den Abstand von einer Schallquelle im Raum, an dem der direkte und der diffuse Schallanteil gleich gross sind.

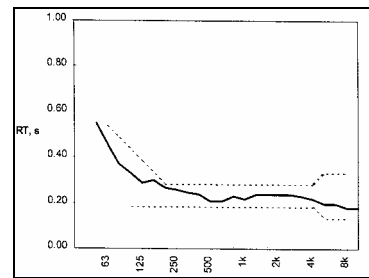
$$Hr = 0.057 \cdot \sqrt{V / RT}$$



Abstand und relativer Pegel

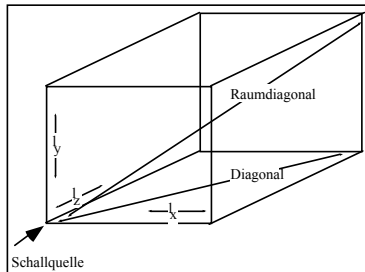


Verhältnis direkter Schall – diffuser Schall

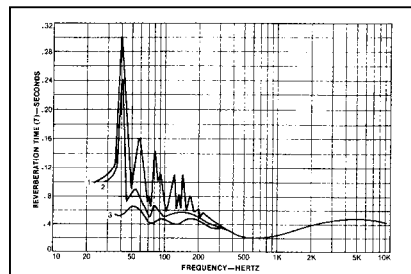


Nachhallzeit in einem Abhörraum

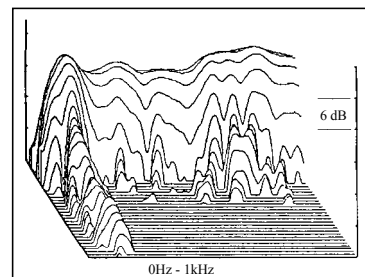
Raumresonanzen



mögliche Richtungen für stehende Wellen



Frequenzgang der Kombination Raum – Lautsprecher



Wasserfall-Diagramm eines Raumes

Berechnung der Raumresonanz-Frequenzen

$$f = \sqrt{((n1 / X)^2 + (n2 / Y)^2 + (n3 / Z)^2)}$$

mit den Wertekombinationen für n1, n2 und n3

n1	1	0	0	1	1	0	1	2	2
n2	0	1	0	1	0	1	1	0	1
n3	0	0	1	0	1	1	1	0	0

.. etc.

Raumproportionen

für eine gleichmässig Staffelnung der Eigenfrequenzen:

1 : 1.5 : 2

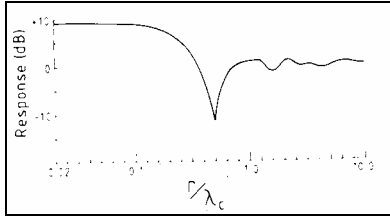
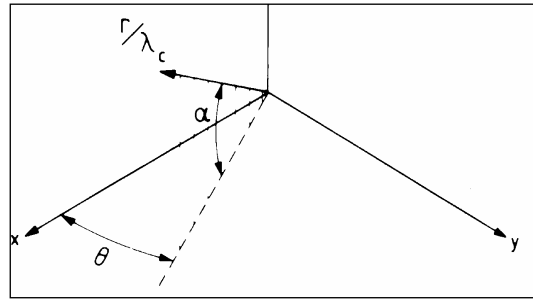
Problem der Schallverteilung

- Verhinderung von diskreten Reflexionen,
- Plazierung von schallabsorbierenden Flächen
- Verhinderung von Raumresonanzen (mit Tiefenabsorbern)

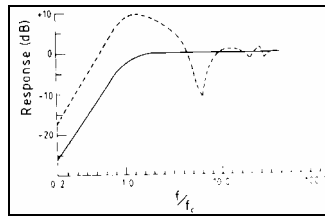
1.4 optimale Platzierung für den Tieftonbereich

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

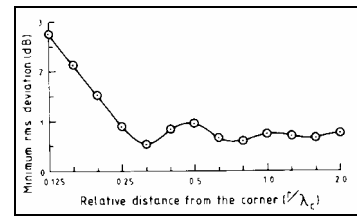
Bild 1 Definition der Aufstellungsposition



Frequenzgang bei einem Abstand von $r/\lambda_c = 0.08$
(bezogen auf Wellenlänge)



Frequenzgang bei einem Abstand von $r/\lambda_c = 0.08$
(Situation von Bild, bezogen auf Resonanzfrequenz f_c)



max. Abweichungen vom geradlinigen Frequenzgang

Optimale Aufstellungsposition für den Tieftonbereich

Q-Wert, Abweichungen vom geradlinigen Frequenzgang und Aufstellungsposition eines Systems 2. Ordnung

Rahmenbedingung: Abstand des Lautsprechers von der nächsten Raumbegrenzungsfläche mindestens $0.6 \lambda_c$

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

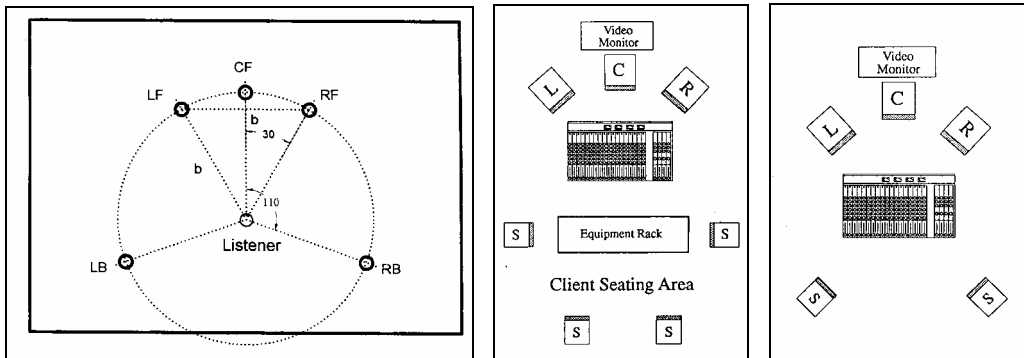
Raumkoordinaten der optimalen Platzierungen

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

2. Platzierung der Lautsprecher im Bezug auf die Zuhörer

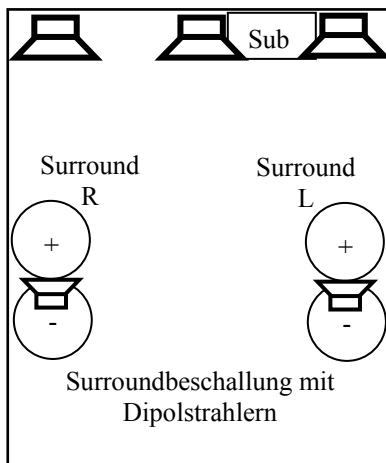
2.1 übliche Lautsprecheraufstellungen

Die Platzierung der Lautsprecher im Raum geschieht üblicherweise Zuhörerbezogen. Die Berücksichtigung der „Interaktion“ zwischen Raum und Lautsprecher steht nicht im Vordergrund.

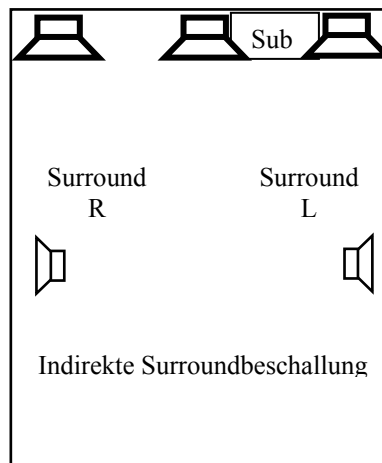


Lautsprecheraufstellung für Dolby Surround: Referenz und In der Praxis

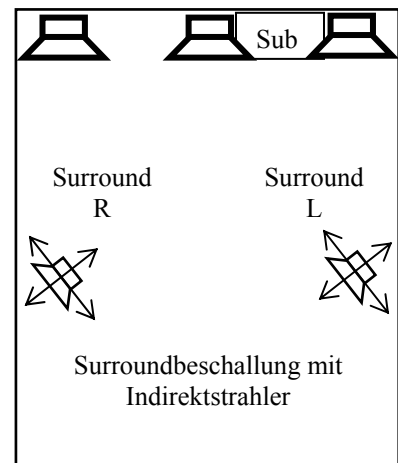
Holman



Bell und Dobson



Diffus-Surround



4. Beurteilung und Optimierung der Wiedergabequalität

4.1 gehörmässige Beurteilung

Wenn man die technischen Daten von hochwertigen Lautsprecherboxen vergleicht, kann man allenfalls marginale Unterschiede feststellen. Die Tatsache, dass theoretisch gleichwertige Lautsprecher völlig unterschiedlich klingen, lässt sich auf Grund der im schalltoten Raum ermittelten technischen Daten nicht erklären.

4.1.1 Testsignal

Als Testsignal für das Ermitteln von Klangverfärbungen eignet sich das „neutral“ klingende pink noise.

Deutlich wahrnehmbare und exakt beschreibbare Klänge sind die Vokale, deren Klangfarbe von sogenannte Formanten bestimmt wird.

Mit dem Begriff Formant bezeichnet man den oder die Teiltonbereiche mit maximaler Stärke innerhalb eines Frequenzspektrums. Den im folgenden Bild dargestellten Spektren kann man entnehmen, das für jeden Vokal zwei Formantbereiche typisch sind.

Bild Vokal-Dreieck

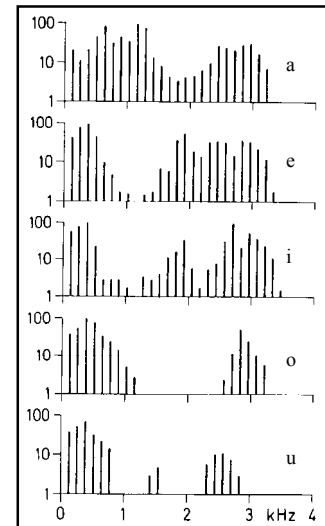
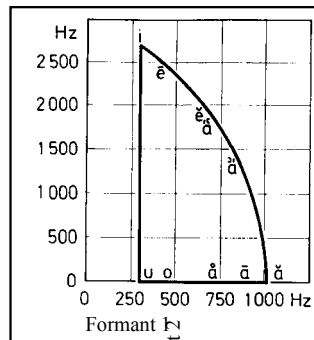


Bild Spektren und Formanten der Vokale

4.1.2 Klangverfärbungen am Zuhörort

Bei der Wiedergabe des pink noise-Signals muss auf Klangverfärbungen geachtet werden, die einen *Vokal-Charakter* haben. Die vom Lautsprecher bevorzugten Frequenzgebiete im Spektrum des pink noise-Signals lassen sich dann dem Vokaldreieck entnehmen.

Durch wechselseitiges Abdecken des Tiefton-, Mittelton- und Hochtonlautsprechers kann ermittelt werden, durch welchen Bereichslautsprecher die Verfärbung verursacht wird.

4.1.3 Ortabhängige Klangverfärbungen

Bei Mehrwegboxen können durch unterschiedliche Abstände zwischen den Lautsprecherchassis und dem Zuhörer in den Uebergangsbereichen zwischen Tiefton- Mittelton- und Hochtonbereichen Auslöschungen und Verstärkungen auftreten. Die Folge sind ortsabhängige Klangverfärbungen, die man leicht durch herumgehen im Wiedergaberaum feststellen kann.

Massgebend für das Auftreten von ortsabhängigen Klangverfärbungen ist die Anordnung der Teilbereichslautsprecher im Gehäuse, die Auslegung der Frequenzweiche und Bodenreflexionen.

Optimal ist natürlich ein Lautsprecher, bei denen keine ortsabhängigen Verfärbungen feststellbar sind. Optimal ist das bei koaxial aufgebauten Kombinationslautsprecher der Fall (Beispiel: Tannoy).

4.1.4 durch die Kombination Raum - Lautsprecher verursachte Klangverfärbungen

Eine alte Weisheit:

Ein Lautsprecher klingt immer so wie der Raum, in dem er steht

In der Praxis wird man also immer die durch die Kombination Lautsprecher – Raum verursachten Klangverfärbungen feststellen können.

4.3 messtechnische Beurteilung

4.3.1 Computerprogramme

4.3.2 Mess-Signal

4.3.3 Messbedingungen

4.3.4 Auswertung der Messergebnisse

4.4 Optimieren der Einheit Lautsprecher – Wiedergaberaum

4.4.1 Schallverteilung im Raum

erster Spiegeltrick

zweiter Spiegeltrick

4.4.3 Raumresonanzen

Wasserfall-Diagramme

Tieftonkorrektur

5. Verfahren zur objektiven gehörmässigen Beurteilung

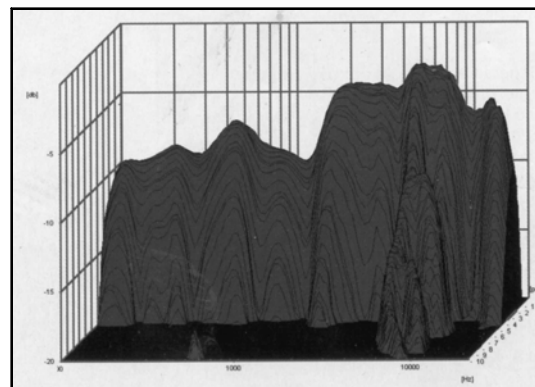
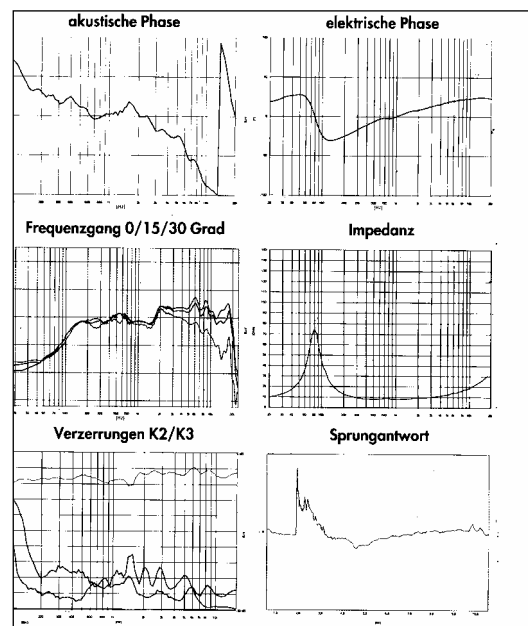
5.1 Grundidee

5.2 Die Original-Schallquelle

5.2.1 Die Mittel-Hochtonchassis

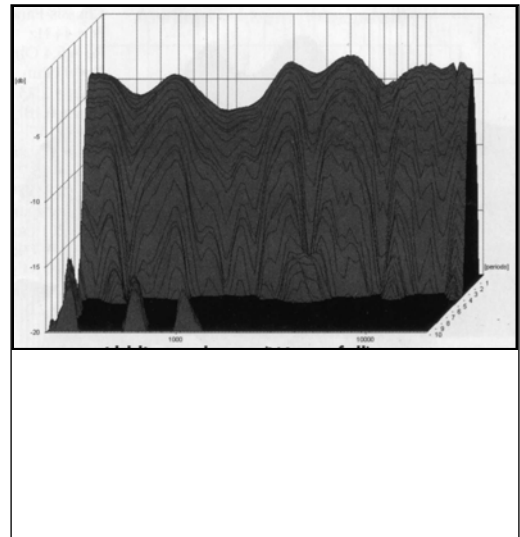
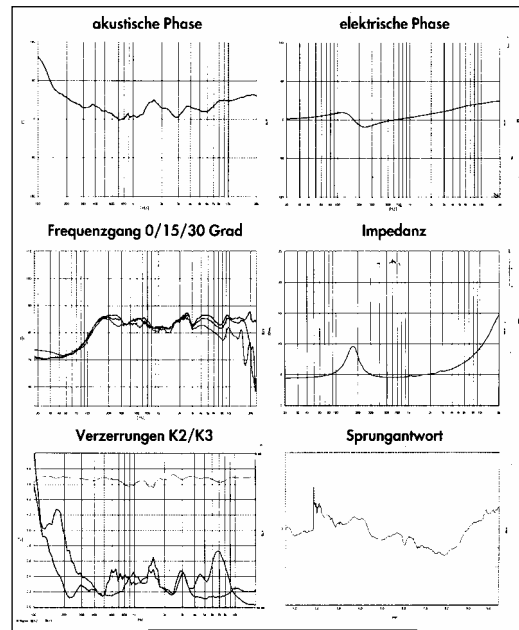
ACR Fostex FE103

Fs 79 Hz
 Re 7.3 Ohm
 Z 8 Ohm
 Qms 2.8
 Qes 0.29
 Qts 0.26
 Vas 6.2 l
 Mms 2.9 g
 Sd 55 cm²
 Rms 0.55 kg/s
 Cms 1.43 mm/N
 No 0.98%
 BxL 5.75 Tm
 Durchmesser x
 Preis x



Jordan JX 53

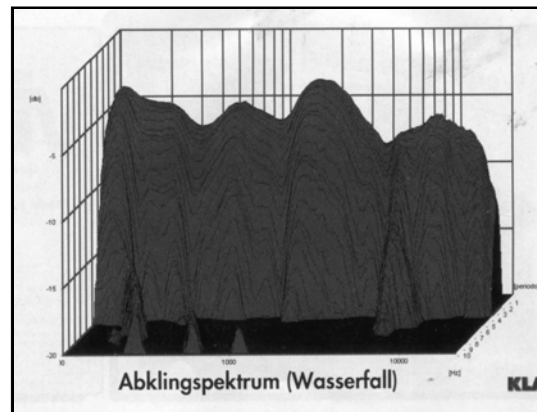
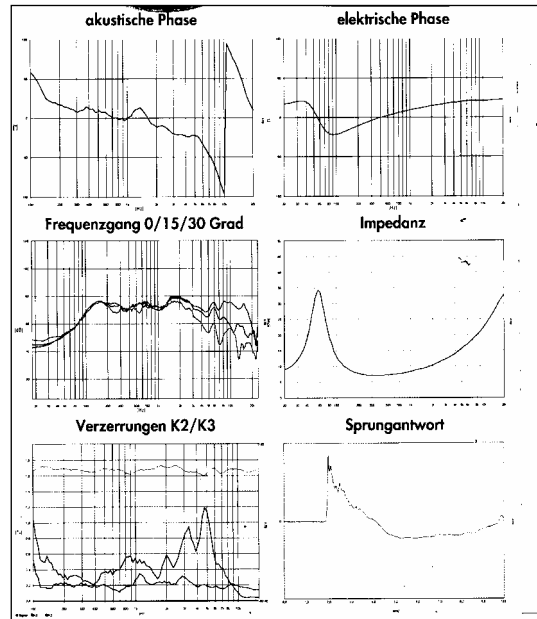
Fs	170 Hz
Re	4.3 Ohm
Z	4 Ohm
Qms	1.73
Qes	1.64
Qts	0.84
Vas	0.52 l
Mms	1.6 g
Sd	26.5 cm ²
Rms	1.1 kg/s
Cms	0.53 mm/N
No	0.15 %
BxL	2.05 Tm
Durchmesser	x
Preis	x



Monacor Number One SPH-60X

Fs	55 Hz
Re	6.4 Ohm
Z	8 Ohm
Qms	2.08
Qes	0.48
Qts	0.39
Vas	11.3 l
Mms	6.3 g
Sd	78 cm ²
Rms	1.15 kg/s
Cms	1.3 mm/N
No	0.39 %
BxL	5.19 Tm

Durchmesser	x
Einbau	x
Gewicht	x
Preis	x



Vifa 10 BGS 119/8

